

UNIVERSITE AIX-MARSEILLE I - UNIVERSITE DE PROVENCE

U.F.R. Psychologie - Sciences de l'Education

Centre de Recherche en Psychologie Cognitive

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE PROVENCE

Formation doctorale : Psychologie

Présentée et soutenue publiquement par

Denis BESNARD

le 22 Décembre 1999

ERREUR HUMAINE EN DIAGNOSTIC

Directeur de thèse :

Pr. Claude BASTIEN

(Centre de Recherche en Psychologie Cognitive, UNIVERSITE DE PROVENCE)

Président du jury

Pr. Jean-Paul CAVERNI

(Centre de Recherche en Psychologie Cognitive, UNIVERSITE DE PROVENCE)

Rapporteurs

Pr. René AMALBERTI (Institut de Médecine Aérospatiale du Service de Santé des Armées, BRETAGNE s/Orge)

Pr. Jean-Claude SPERANDIO (Laboratoire d'Ergonomie Informatique, UNIVERSITE PARIS V)

Je remercie très vivement la Direction Générale de l'Armement. Son financement m'a permis de travailler dans des conditions matérielles confortables. Il a également autorisé l'adoption de dispositifs expérimentaux naturels et l'étude de situations de travail réelles.

Merci en particulier à M. Jean-François Vautier qui a assuré le suivi scientifique pour le Ministère de la Défense.



Remerciements

Mes remerciements vont évidemment vers Claude BASTIEN qui m'a laissé une totale liberté de travail. L'autonomie dont j'ai bénéficié m'a parfois plongé dans d'insondables moments de doute mais j'espère être à la hauteur de la confiance dont j'ai bénéficié. L'issue de la soutenance devrait nous renseigner assez clairement sur ce point. Je ne voudrais pas laisser croire que vous (Claude) laissez vos étudiants patauger. Ou plutôt, si, lorsque telle est leur volonté. Pour rétablir tout à fait la vérité, je dois dire que j'ai bénéficié du compromis idéal de liberté et de disponibilité. J'ai toujours pu m'appuyer sur votre présence lorsque c'était nécessaire. Nos entrevues, du fait de mon caractère un peu solitaire, ont été très espacées mais toujours extrêmement constructives. L'entrée dans le DEA m'a engagé dans un travail dont je ne soupçonnais pas l'ampleur. Si c'était à refaire... je réfléchirais. Mais je crois que la question n'est plus d'actualité. Aujourd'hui, je suis infiniment content que cette épopée touche au but. Merci Claude.

Merci à M. Jean-Paul CAVERNI, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire. Une fois encore, je dois remercier la liberté et l'autonomie qui m'ont été accordées.

Merci également à Thierry BOLLON, pour les remarques qu'il a formulé au début de ce travail. Son départ d'Aix en Provence m'a privé des conseils de l'ergonome expérimentaliste. Thierry, peut-être allons-nous enfin finir cet article que nous avons commencé il y a maintenant quelques années... *Mea culpa* mais on ne peut pas tout faire.

J'envoie un merci affectueux à Anne DEBRAY-DECORY, Josiane PAYEN, Michèle CHAMBERT ainsi qu'à l'ensemble des personnels du CREPCO et de l'UFR.

Je remercie également toutes les personnes qui ont participé à la construction des dispositifs expérimentaux, au recrutement des sujets et aux expériences. Merci donc, dans l'ordre chronologique :

- . aux électroniciens du Port Autonome de Marseille ;
- . à Monsieur PERCHET, professeur de mécanique auto au Centre de Formation d'Apprentis Sainte Victoire d'Aix en Provence ainsi qu'aux apprentis de la promotion 96-97 ;
- . à Monsieur JUGE, Directeur de PEUGEOT Aix-Les-Milles et Monsieur GUGLIELMINETTI, Chef du service après vente, ainsi qu'aux mécaniciens ;

- . à Messieurs Richard et Didier MOUSSOUYAN, du garage PEUGEOT Simiane ainsi qu'à Félix, Jean-Luc et Gaétan pour l'aide matérielle qu'ils m'ont offerte et les conseils qu'ils m'ont donnés durant les périodes où nous avons travaillé ensemble ;
- . au Colonel LOCHET, commandant la Base aérienne 114 d'Aix les Milles, qui m'a indiqué des contacts fructueux ;
- . au Colonel THOMAS, commandant la Base aérienne de Bordeaux-Mérignac, au Capitaine MOY, de l'atelier de mécanique de l'ARAA 623 de Bordeaux-Mérignac ainsi qu'aux mécaniciens ;
- . au Commandant PIC, Officier des relations publiques de l'Arsenal de Toulon, au Capitaine COLOZZO du CIN Saint-Mandrier, au Capitaine HOUEVILLE et au Commandant LE HIR de la SFS à Toulon, au Major BOYER du CARMM à Toulon ainsi qu'aux mécaniciens et électroniciens ;
- . à Monsieur DERHILLE, Directeur du lycée professionnel Mistral à Marseille, à Monsieur MORILLON ainsi qu'aux élèves du Bac professionnel de mécanique ;
- . au Colonel MORDANT, commandant la Base aérienne 278 d'Amberley, au Lieutenant CHERPRENET de la Division Transmissions ainsi qu'aux électroniciens ;
- . à Monsieur GRECK, Proviseur du Lycée Vauvenargues à Aix en Provence, à Monsieur TRICHE, Professeur d'électronique ainsi qu'aux élèves de terminale STI.

A mes parents. Je leur dois 20 ans
de patience et d'acharnement.

*On ne fait pas boire un
âne qui n'a pas soif.*
L'âne a eu soif et il a bu.

Table des matières

1.	<u>DONNEES THEORIQUES SUR LE RAISONNEMENT</u>	11
1.1	<u>ORIENTATION THEORIQUE</u>	12
1.1.1	L'ergonomie cognitive	12
1.1.2	L'ergonomie cognitive sur le terrain	13
1.1.3	Le diagnostic et la recherche	13
1.2	<u>DEUX MODELES DE LA COGNITION</u>	15
1.2.1	Le modèle de Rasmussen	15
1.2.2	Le modèle de Reason	17
1.3	<u>LE RAISONNEMENT</u>	21
1.3.1	La conception classique	21
1.3.2	Déduction, induction, abduction	23
1.3.3	Les formes de représentation des connaissances	25
1.3.3.1	La représentation dans le raisonnement	25
1.3.3.2	Les modèles mentaux	26
1.3.4	Le raisonnement par analogie	28
1.3.4.1	Des conceptions divergentes	31
1.3.4.2	L'analogie dans le diagnostic	33
1.3.5	Limites de la conception classique du raisonnement	33
1.4	<u>L'EXPERTISE</u>	35
1.4.1	Présentation	36
1.4.2	Etats discrets ou continuum ?	38
1.4.3	La théorie des chunks	39
1.4.4	Habiletés de mémoire et mémoire de travail à long terme	42
1.4.5	La théorie des schémas	43
1.4.6	Les partisans d'une organisation spécifique des connaissances	45
1.4.6.1	Organisation des connaissances et performance : Le formalisme largeur-profondeur	45
1.4.6.2	Des processus automatiques sous contrôle	47
1.4.7	Problèmes connus et problèmes inconnus	47
1.4.8	L'heuristique de fréquence et le principe d'économie	50
1.4.9	La variabilité	52
1.4.10	Le raisonnement expert ? Un appariement	54
1.5	<u>L'ERREUR</u>	55
1.5.1	Présentation	55
1.5.2	Typologie de l'erreur	56
1.5.3	Des biais dans le diagnostic	59
1.5.3.1	Le biais de confirmation	60
1.5.3.2	Le biais de fréquence	60
1.5.4	Conclusion du chapitre	61
1.6	<u>L'ACTIVITE DE DIAGNOSTIC</u>	63

1.6.1	Diagnostic sur réseau formel	63
1.6.2	L'identification des symptômes	69
1.6.3	Le diagnostic comme correction d'une déviation	71
1.6.4	Le diagnostic comme activité de classification	73
1.6.5	Le diagnostic comme composante de la prise de décision	74
1.6.6	Une composante du diagnostic : la dynamique	77
1.6.6.1	La gestion des ressources	78
1.6.6.2	La gestion des incidents	79
1.6.6.3	Echelles de temps	80
1.6.6.4	Pathologie de la prise de décision	81
1.6.7	Le diagnostic comme activité de contrôle et de supervision	81
1.6.7.1	Gestion de compromis en contrôle de processus : l'exemple de l'anesthésie	83
1.6.7.2	Les situations d'apprentissage implicite	84
1.6.7.3	De l'apprentissage implicite à la théorie des schémas	87
1.6.8	Les stratégies de diagnostic	88
1.6.8.1	Stratégie topographique et stratégie symptomatique	88
1.6.8.2	Stratégie globale <i>vs</i> locale	90
1.6.8.3	Stratégies séquentielles	91
1.6.8.4	La représentation dans la stratégie	92
1.6.8.5	Flexibilité des stratégies	93
1.6.9	Des modèles de diagnostic automatique	93
1.6.9.1	Les systèmes experts	95
1.6.9.2	Les modèles connexionnistes	97
1.6.10	Quelle conception du diagnostic pour notre recherche ?	99
1.7	<u>HYPOTHESE THEORIQUE</u>	101
2.	<u>EXPERIMENTATION</u>	103
2.1	<u>PRESENTATION DES EXPERIENCES</u>	104
2.2	<u>PRE-EXPERIENCE EN ELECTRONIQUE</u>	106
2.2.1	Méthode	106
2.2.1.1	Sujets	106
2.2.1.2	Matériel	106
2.2.1.3	Description de la panne	108
2.2.1.4	Consignes	109
2.2.1.5	Procédure	109
2.2.1.6	Plan d'expérience	110
2.2.1.7	Variables	110
2.2.1.8	Prédiction	111
2.2.2	Résultats	111
2.2.3	Discussion	113
2.3	<u>EXPERIENCE FINALE EN ELECTRONIQUE</u>	116
2.3.1	Méthode	116
2.3.1.1	Sujets	116
2.3.1.2	Matériel	116
2.3.1.3	Description de la panne	117
2.3.1.4	Consignes	117

2.3.1.5	Procédure	118
2.3.1.6	Plan d'expérience	118
2.3.1.7	Variables	118
2.3.1.8	Prédictions	121
2.3.2	Résultats	121
2.3.3	Discussion	126
2.3.3.1	Fiabilité des composants, principe d'économie et heuristique de fréquence	128
2.3.3.2	Sous-optimalité	129
2.4	<u>CONCLUSION DES PASSATIONS EN ELECTRONIQUE</u>	131
2.5	<u>PRE-EXPERIENCE EN MECANIQUE</u>	132
2.5.1	Méthode	132
2.5.1.1	Sujets	132
2.5.1.2	Matériel	132
2.5.1.3	Description de la panne	133
2.5.1.4	Consignes	134
2.5.1.5	Procédure	135
2.5.1.6	Plan d'expérience	136
2.5.1.7	Variables	136
2.5.1.8	Prédictions	137
2.5.2	Résultats	138
2.5.3	Discussion	140
2.6	<u>EXPERIENCE FINALE EN MECANIQUE</u>	143
2.6.1	Méthode	143
2.6.1.1	Sujets	143
2.6.1.2	Matériel	143
2.6.1.3	Description de la panne	144
2.6.1.4	Consignes	144
2.6.1.5	Procédure	145
2.6.1.6	Plan d'expérience	145
2.6.1.7	Variables	145
2.6.1.8	Prédictions	148
2.6.2	Résultats	149
2.6.3	Discussion	150
2.7	<u>CONCLUSION DES PASSATIONS EN MECANIQUE</u>	153
2.8	<u>DISCUSSION GENERALE</u>	155
3.	<u>ACCIDENTS DES TRANSPORTS ET CATASTROPHES INDUSTRIELLES</u>	158
3.1.1	Les niveaux de traitement dans les accidents de la route	159
3.1.2	Les accidents aériens	161
3.1.2.1	La représentation de la situation	162
3.1.2.2	Crash d'un A320 au Mont Sainte Odile, Bas-Rhin	165
3.1.2.3	Atterrissage train rentré d'un DC9 à Houston, Texas	168
3.1.2.4	Crash d'un Boeing 737 à Kegworth, Royaume Uni	172
3.1.3	Les accidents industriels	175

3.1.3.1	Explosion à la centrale nucléaire de Three Mile Island, Pennsylvanie	175
3.1.3.2	Explosion à la centrale nucléaire de Tchernobyl, Ukraine	178
3.1.4	La composante humaine dans les systèmes	180
3.1.4.1	Ressources cognitives et complexité	182
3.1.4.2	Les outils d'analyse d'événements	183
3.1.4.3	Prévention, détection et récupération	189
3.1.4.4	Les systèmes d'aide et l'opérateur	193
3.1.5	Vers une ergonomie cognitive industrielle?	196
4.	<u>CONCLUSION GENERALE</u>	<u>198</u>
5.	<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	<u>201</u>
6.	<u>TABLE DES ILLUSTRATIONS</u>	<u>224</u>
7.	<u>ANNEXES</u>	<u>226</u>
7.1	<u>SCHEMAS DU CIRCUIT ELECTRONIQUE</u>	<u>227</u>
7.2	<u>GRILLES DE RECUEIL DE DONNEES</u>	<u>229</u>
7.3	<u>TABLES D'ANALYSE DE VARIANCE.</u>	<u>231</u>
7.3.1	Expérience finale électronique	231
7.3.2	Pré-expérience mécanique	238
7.3.3	Expérience finale mécanique	241
7.4	<u>TABLES DE DONNEES</u>	<u>248</u>
7.4.1	Pré-expérience en électronique	248
7.4.2	Expérience finale en électronique	249
7.4.3	Pré-expérience en mécanique	251
7.4.4	Expérience finale en mécanique	252

Introduction

Le travail présenté ici traite de l'erreur en situation de diagnostic. La thèse tentera de montrer que l'expertise dans ce domaine n'est pas une garantie de résultats. L'exposé théorique essaiera de convaincre le lecteur qu'une compétence dans un domaine de connaissance est liée à la fréquence d'apparition des cas à traiter. Plus un cas est fréquent, plus la résolution du problème qu'il pose est fiable et rapide. Cette association entre un cas et sa solution devient un outil largement utilisé par le dépanneur expert. On verra que les experts commettent des erreurs en appliquant des procédures de dépannage connues à des problèmes qu'ils n'ont parfois jamais rencontrés. De cette application automatique naissent des erreurs d'interprétation de symptômes et des comportements qui dévient du diagnostic optimal. Cette problématique est étudiée dans le cadre d'activités de diagnostic chez les électroniciens et les mécaniciens. On se penchera sur les stratégies mises en œuvre et les types d'erreurs commises.

Le texte se divise en trois parties. La première présente les bases théoriques sur lesquelles repose ce travail. On y passera en revue certains concepts théoriques qui permettront d'une part de cadrer la problématique et, d'autre part, d'analyser les résultats des expériences. On descendra par étapes successives depuis un cadre théorique général (l'ergonomie cognitive en l'occurrence) vers des modèles du fonctionnement cognitif de l'opérateur puis, pour finir, vers les différentes composantes de l'activité de raisonnement en situation de diagnostic. La deuxième partie est expérimentale. On y présentera les expériences, les résultats et leur discussion. La troisième et dernière partie traite des extensions de ce travail. L'objectif sera alors d'exposer certains accidents industriels et des transports et de tenter d'éclaircir, à la lumière des résultats obtenus dans les expériences, les conditions dans lesquelles ces faits sont survenus.

1. DONNEES THEORIQUES SUR LE RAISONNEMENT

1.1 ORIENTATION THEORIQUE

La recherche fondamentale a pour objectif d'étudier des processus généraux en élaborant des tâches supposées signifier la même chose pour tous les sujets. Cependant, il est important de considérer les effets des connaissances et du contexte préalables si on veut comprendre les processus cognitifs (Green & Hoc, 1991). Les situations de travail peuvent être complexes mais sont souvent bien définies puisque les opérateurs disposent de connaissances et de représentations de la tâche. L'indispensable réduction imposée par l'approche expérimentale est contrôlée par la considération explicite des relations entre la situation expérimentale et la situation à laquelle les résultats expérimentaux peuvent être généralisés. A l'instar de Hoc (1993), on pense que les situations de terrain ne sont pas moins fondamentales que les situations de laboratoire en ce qu'elles permettent, par leur richesse, de faire apparaître les comportements étudiés. En outre, elles offrent un avantage sur les situations de laboratoire : on s'adresse à des sujets dont la représentation de la tâche est déjà relativement stabilisée. On est donc plus près d'une interprétation non ambiguë des résultats. Cette position théorique soutient le choix du terrain pour ce travail.

1.1.1 L'ergonomie cognitive

L'ergonomie date des années 46-49 et elle intègre des recherches issues de la psychologie, de la physiologie, de la sociologie ainsi que de l'ingénierie et de la médecine du travail. Si à l'origine, avant l'introduction même du terme d'ergonomie, c'est l'analyse du travail qui est première et fondatrice des questions posées aux autres disciplines scientifiques, l'évolution qui se dessine est celle d'une subordination aux théories psychologiques (Dubois, 1991). L'ergonomie a été qualifiée de cognitive dès lors qu'elle a intégré, dans son approche de l'homme au travail, les capacités de raisonnement de l'opérateur. Aujourd'hui, le caractère cognitif de l'ergonomie n'est plus remis en question. Christol et Mazeau (1991) parlent même de pléonasme : *"L'ergonomie ne peut pas ne pas être cognitive. L'analyse de l'activité de travail, la prise en compte du facteur humain dans les systèmes de production impliquent forcément de s'intéresser aux processus mentaux [...]. Mais l'ergonomie ne peut pas être que cognitive dans la mesure où cela reviendrait à tenter d'expliquer des comportements en faisant abstraction des autres niveaux de fonctionnement"* (p. 385-386). Pour ces auteurs, l'ergonomie est devenue une aide à la conception d'équipements et d'organisations adaptés aux missions à

remplir, aux caractéristiques des individus et aux conditions dans lesquelles se fera le travail. De ce point de vue, il existe une différence importante entre les sciences cognitives et l'ergonomie. Bien qu'on puisse espérer que le développement des sciences cognitives puisse servir la condition humaine au sens large, la recherche dans ce domaine peut se développer sans référence directe à un tel espoir. La recherche en ergonomie cognitive, au contraire, a pour but explicite d'améliorer les conditions de travail (Green & Hoc, 1991).

1.1.2 L'ergonomie cognitive sur le terrain

L'ouverture de la recherche en ergonomie cognitive vers des problématiques de terrain implique la mise en œuvre de moyens matériels et expérimentaux différents (parfois plus lourds) de ceux que l'on utilise dans les recherches de laboratoire. La raison tient à la nature de la situation elle-même qui, de par sa complexité, mobilise des systèmes de recueil de données adaptés. Peut-être faut-il voir dans ces contraintes un frein à l'exportation de la psychologie cognitive vers le terrain. Un autre frein tient probablement à la place qu'occupent les ordinateurs dans notre vie professionnelle, importance qui a fait naître un courant de recherches spécialisées dans un domaine que la littérature internationale désigne par l'acronyme de HCI (*Human-Computer Interaction*). L'apparition de ce courant de recherches constitue un frein à l'étude de terrain dans la mesure où l'interaction homme-ordinateur se prête aisément et préférentiellement à une étude de laboratoire. Cela permet d'étudier finement l'activité mais cela la décontextualise. On en arrive à une situation de dépendance théorique de l'ergonomie et des sciences cognitives vis-à-vis de l'outil informatique (Dubois, 1991).

On aura compris que cette recherche tente d'étudier les opérateurs dans leur milieu de travail, avec leurs outils propres et dans des situations matérielles faisant partie de leur domaine d'activité.

1.1.3 Le diagnostic et la recherche

Le diagnostic est une activité qui se situe au carrefour de plusieurs champs de recherche. Son étude implique la prise en compte de données issues à la fois de courants traditionnels de la psychologie cognitive (raisonnement, expertise, mémoire, etc.) et de concepts à caractère ergonomique (charge de travail, stratégies opératoires, erreur, etc.). La conception classique de la résolution de problème est un déplacement dans un espace problème depuis l'état courant vers

l'état but. Le sujet applique des opérateurs qui permettent de réduire la différence entre l'état courant et l'état but (Anderson, 1993). Celui-ci est atteint par la mise en oeuvre de connaissances, règles, stratégies, heuristiques et autres modèles mentaux (Evans, 1993, Byrne, Handley & Johnson-Laird, 1992, Johnson-Laird, Byrne & Schaeken, 1992, Byrne & Handley, 1992, Byrne, 1989, 1991). Cette activité est largement modulée par le niveau de compétence de l'opérateur ainsi que par la situation dans laquelle est située l'activité. Dans le cas d'un raisonnement qui vise à découvrir les causes de l'état d'un système en panne (entendons par système tout ensemble d'éléments assemblés dans un but de fonctionnement), on parle de diagnostic. Mais le diagnostic n'est pas impliqué uniquement dans la recherche des causes d'un dysfonctionnement. Son champ d'application s'étend du dépannage jusqu'à la prise de décision, en passant par les activités de supervision. Il est souvent impliqué en tant que composante de l'activité dans des processus plus globaux, dont il n'est qu'une facette. Il n'est ni indépendant, ni séparable d'autres activités. C'est une partie d'une activité finalisée et non pas le but de l'activité elle-même (Hoc, 1996).

L'exécution d'une tâche passe par la construction d'un compromis cohérent et efficace entre les contraintes de l'environnement (outils, temps, actions à mener, etc.), les caractéristiques cognitives fonctionnelles (stratégies) et structurelles (organisation cognitive) et les objectifs à atteindre. Des mécanismes d'erreur, des principes d'économie de ressources, des variations du niveau de performance sont autant de sources de déstabilisation de cet ordonnancement attendu. Chacun trouve des heuristiques qui permettent d'ajuster, d'anticiper ces aléas et d'établir des formes d'activités qui compensent ces variations (Mariné & Valot, 1993). Le travail présenté ici s'insère dans cette conception du fonctionnement humain. L'orientation qui lui sera donnée est ergonomique en tant que son objet de recherche est l'homme au travail (Laville, 1991). On essaiera de répondre à un double objectif : élaborer des connaissances scientifiques et les appliquer à l'aménagement du travail (Spérandio, 1988 ; Amalberti, 1991b ; Hoc, 1993).

1.2 DEUX MODELES DE LA COGNITION

La présentation des modèles qui suit n'a pas pour objectif de détailler la conception des auteurs, mais plutôt de donner un aperçu des fondements théoriques sur lesquels cette recherche va reposer. Les deux auteurs présentés dans ce chapitre, respectivement Jens Rasmussen et James Reason, ont apporté une contribution à la fois originale et majeure à la compréhension des activités cognitives. Cette thèse traite de comportements automatisés et d'erreurs. C'est la raison pour laquelle ce sont ces auteurs qui ont été retenus en tant que références théoriques. La discussion des données recueillies dans cette recherche reposera en grande partie sur les propositions théoriques de ces auteurs. On pourra s'apercevoir que les deux modèles sont fonctionnalistes, étant entendu que cette approche privilégie l'étude du fonctionnement des processus mentaux plutôt que celle des structures qui les sous-tendent (Lemaire, 1999). Les différences entre des modélisations plus centrées sur les structures et le type de modélisation présenté ici s'expliquent, selon Spérandio (1995, p. 10), par le fait que *"les modèles de l'ergonomie sont typiquement des modèles plus descriptifs qu'explicatifs et les formalismes de ces modèles sont empruntés aux formalismes de l'informatique, de l'automatique ou de l'intelligence artificielle. Ils sont simples, opératoires, souvent réducteurs (c'est leur but)"*.

1.2.1 Le modèle de Rasmussen

Le modèle de Rasmussen (1986) (Cf. Figure 1) prévoit 8 étapes dans la prise de décision et comporte des raccourcis qui rendent compte de la manière dont l'information est traitée par un sujet expérimenté dans un domaine d'activité. Le modèle décrit à la fois un mode de prise de décision séquentiel ainsi que de nombreux modes plus courts, fondés sur l'application de raccourcis. Lorsqu'une nécessité d'action apparaît (activation), une alerte est déclenchée qui conduit le sujet à collecter de l'information sur l'état du système (observation). A ce stade, l'expérience joue un rôle important. Si le sujet est expérimenté, il dispose en mémoire d'une réponse à la situation en termes d'action. Dès lors que l'information est collectée, celle-ci sert d'indice à l'activation en mémoire d'une procédure "prête à l'emploi". Le sujet expérimenté, en procédant ainsi, a la possibilité d'omettre des étapes dans l'algorithme de résolution, de fournir une réponse rapidement et de laisser disponibles des ressources attentionnelles.

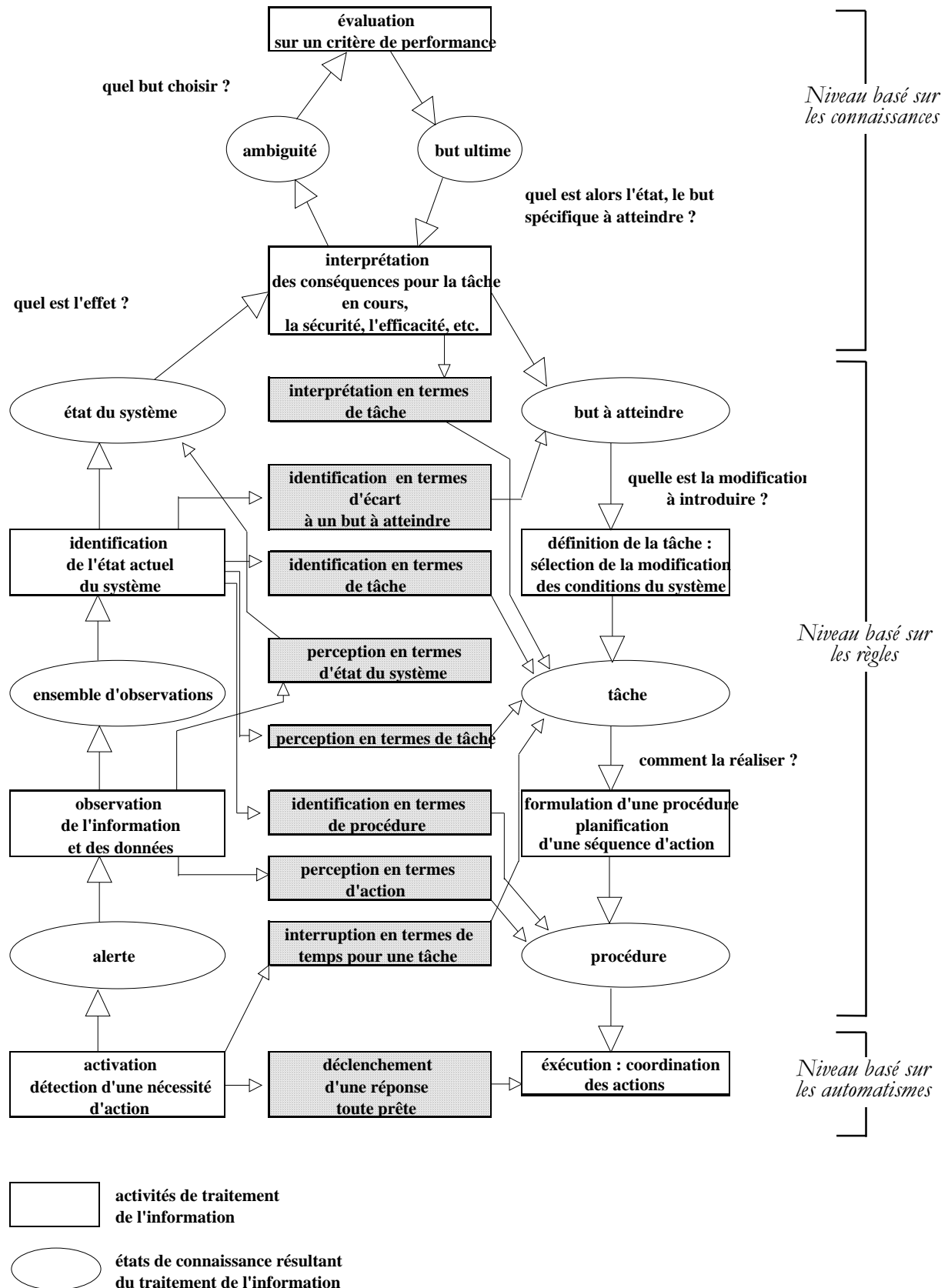


Figure 1: Le modèle de Rasmussen (1986)

C'est le type de comportement que peuvent montrer des mathématiciens lorsqu'ils résolvent des problèmes d'algèbre. Ils sont capables de sauter des étapes dans l'algorithme de résolution (Blessing & Anderson, 1996). Si le sujet est inexpérimenté, il doit traiter la situation en appliquant des processus de traitement contrôlés. Le raisonnement se poursuit et le sujet doit identifier l'état du système (identification), inférer les conséquences de l'état du système sur la tâche en cours (interprétation), tester son hypothèse (évaluation), trouver une tâche qui permette de traiter la situation (sélection du but), planifier cette tâche (sélection de la procédure) et l'exécuter (exécution). Ce modèle ne comporte pas de structures de mémoire ou de processeur car ce n'est pas une modélisation à but architectural.

A la suite de Hoc (1996), on peut faire une remarque à propos de la modélisation essentiellement réactive que Rasmussen propose. L'opérateur humain n'est pas strictement passif dans son environnement. Il ne réagit pas toujours aux informations au moment où elles lui parviennent. Il a des attentes qui lui permettent d'anticiper certains événements. Cette caractéristique a un rôle important en ce qui concerne la prévention des accidents. Cette précision ne vaut que pour les situations dynamiques, où l'opérateur n'est qu'un élément du système. Dans un système purement statique, dont les changements d'états sont entièrement déterminés par les actions de l'opérateur, l'anticipation n'a pas autant d'importance. Le modèle présenté ici permet de rendre compte des différents niveaux de traitement impliqués dans une situation de prise de décision. C'est cette caractéristique qui intéressera notre recherche dans laquelle il faudra rendre compte du fonctionnement cognitif de sujets experts et de sujets novices. L'analyse des données se fera en partie au moyen de ce modèle.

1.2.2 Le modèle de Reason

La proposition de Reason tente de répondre à la question suivante : *"Quel dispositif de traitement de l'information pourrait fonctionner correctement la plupart du temps, mais également produire, à l'occasion, de mauvaises réponses à l'instar du comportement humain ?"* (Reason, 1990, p 179). La réponse de l'auteur est appelée machine faillible. Ses composantes structurales principales sont une mémoire de travail et une base de connaissances. Le fonctionnement de la machine repose sur des échanges d'information entre mémoire à long terme (la base de connaissances) et mémoire de travail qui sous-tendraient le mécanisme d'apprentissage (Baddeley, Papagno & Vallar, 1988). Reason distingue deux types de mémoire de travail. Le premier type est une mémoire de travail focale. Il s'agit d'un espace de travail à capacité limitée qui reçoit les informations en provenance de l'extérieur et de la base de connaissances (Cf. Figure 2).

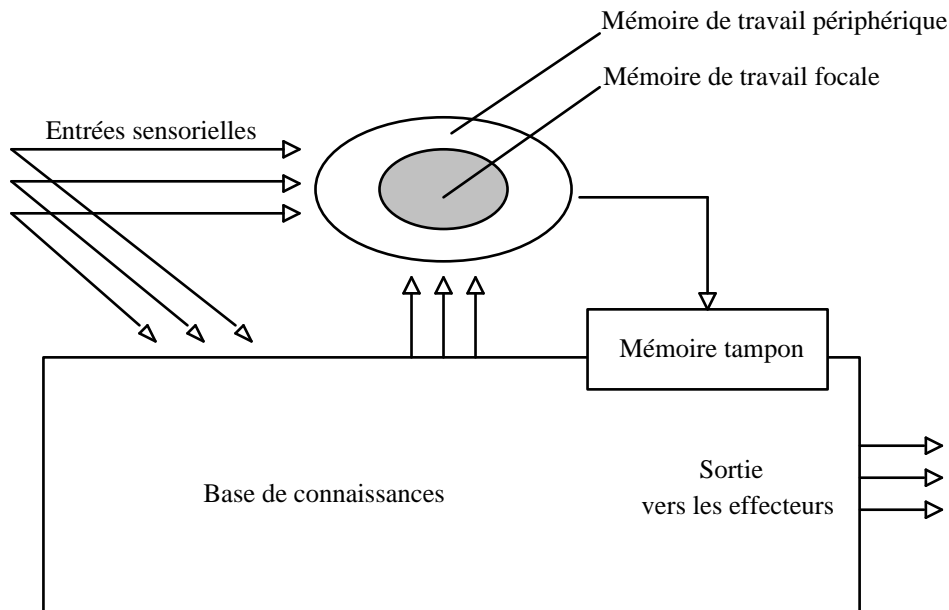


Figure 2 : Les composantes structurales principales de la machine faillible (Reason, 1990)

Les informations traitées sont alors transférées dans une mémoire tampon de la base de connaissances. Le second type de mémoire de travail est de type périphérique. Sa fonction essentielle est de gérer les accès à la mémoire de travail focale, selon des principes de priorité. Elle est composée de la boucle articulatoire et du bloc-notes visuo-spatial, issus du modèle de la mémoire de travail de Baddeley (1992, 1996). Les informations qui proviennent des entrées sensorielles sont essentiellement visuelles. Dans son modèle (Cf. Figure 3), Reason (1990, p. 191) précise les liens qu'entretiennent mémoire de travail et base de connaissances. *"Lors du traitement d'un problème, l'action des mécanismes automatiques d'appariement par similarité et de sélection par la fréquence sur les indices de recouvrement initiaux fournit une première réponse à la mémoire de travail (étape 1). La mémoire de travail évalue cette solution et la trouve inadéquate. Les processus analytiques produisent alors des indices de recouvrement corrigés. Ces derniers sont ensuite traités dans la base de connaissances et une seconde solution est envoyée en mémoire de travail (étape 2). La solution est à nouveau jugée inadéquate et de nouveaux indices sont produits par les traitements en mémoire de travail (étape 3). La troisième solution est considérée comme satisfaisante et elle est émise (étape 4)".* Une des particularités de la conception de Reason est qu'il accorde un rôle actif à la base de connaissances. Dans cette structure, on trouve des traitements automatiques, chargés de trouver de l'information sur la base d'indices de recherche (les traitements automatiques subséquents). On trouve également une mémoire tampon.

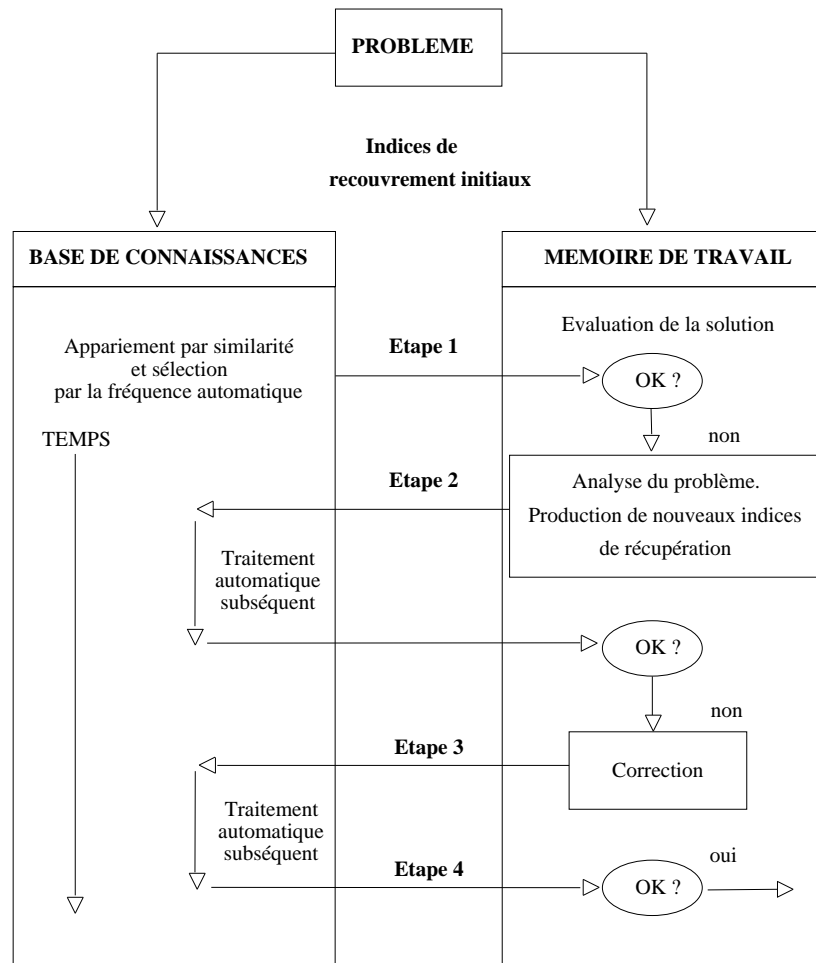


Figure 3 : Traitement concurrent par la base de connaissances et la mémoire de travail pendant la résolution de problème (Reason, 1990)

Dans la conception classique, les informations à maintenir actives pendant la résolution du problème sont stockées en mémoire de travail et participent à l'augmentation de la charge. Ici, ce n'est pas le cas. Des traitements ont lieu dans la base de connaissances. On se rapproche de la théorie des habiletés de mémoire (Ericsson & Staszewski, 1989 ; Ericsson & Kintsch, 1995) selon laquelle la mémoire à long terme n'a pas toujours un rôle de stockage passif (Cf. 1.4.4 Habiletés de mémoire et mémoire de travail à long terme).

Ce qui est présenté du travail de Reason, dans ce chapitre, ne concerne que le modèle de la cognition. Les données théoriques à propos de l'erreur humaine seront présentées plus loin (Cf. 1.5 L'erreur). Ce modèle de la cognition participe au cadre théorique de cette recherche non pas pour son niveau de détail des processus cognitifs (qui reste d'un niveau très général et assez imprécis (Grant, 1997)) mais pour l'intégration de processus de traitement semblables à des biais. Ce sont des processus de bas niveau sur lesquels l'opérateur au travail a peu de contrôle et qui

peuvent mener à des erreurs. Leur rôle dans le traitement de l'information est capital car ils déterminent une partie des connaissances qui seront activées dans la situation traitée.

Le modèle est composé d'un mécanisme de recherche d'information en MLT d'une part et d'un mécanisme qui évalue les différents états du problème d'autre part. Dans l'ensemble, le fonctionnement est itératif. Des cycles successifs d'évaluation et de recherche permettent d'atteindre la solution ou un état jugé acceptable. Les indices situationnels servent de déclencheurs aux connaissances stockées en mémoire à long terme. Ce déclenchement repose, selon Reason, sur un appariement par similarité ou sur une sélection par la fréquence. Si certains indices déclenchent certaines connaissances, alors la répétition de ce déclenchement va renforcer les liens qui les associent. Quand ces indices se présenteront une nouvelle fois, les processus d'appariement par similarité ou de sélection par la fréquence vont se mettre en oeuvre et activer les connaissances associées, même si ces indices ne sont que partiels et qu'ils ne représentent qu'imparfaitement la situation.

1.3 LE RAISONNEMENT

On va entrer ici dans des considérations théoriques afin d'aborder les processus cognitifs impliqués dans le raisonnement. On présentera tout d'abord la conception classique du raisonnement, qui conçoit un problème comme un espace et l'activité de résolution comme l'application d'opérateurs ou de règles de production. Ces règles peuvent revêtir différents aspects, essentiellement déductif, inductif et abductif. Ce sera l'objet du deuxième point de ce chapitre. On abordera ensuite les représentations et les modèles mentaux, concepts voisins qui jouent un rôle central dans la conception moderne de la résolution de problème. Ils permettent par exemple au sujet de maintenir des caractéristiques situationnelles sous une forme virtuelle à des fins de simulation intériorisée. La question de l'analogie entre problèmes sera évoquée en tant qu'outil de résolution.

Comme cet aperçu du chapitre le laisse entrevoir, la discussion tente d'exposer les différents concepts qui définissent l'activité de raisonnement. Ce faisant, on délaissera les aspects sociaux du raisonnement et les facteurs qui interviennent sur son déroulement. On fait allusion ici aux effets de la perception infraliminaire sur la résolution de problème (Besnard & Channouf, 1994) et à l'ensemble des données expérimentales de ce champ de recherche (Pour une revue, voir Channouf & Pichevin, 1998).

1.3.1 La conception classique

La formalisation de l'activité de résolution de problèmes en termes de déplacement dans un réseau d'états organisés (un espace problème) n'est pas récente. Elle remonte à Newell et Simon (1972). Ces auteurs considèrent la résolution d'un problème comme le déplacement à l'intérieur d'un graphe dont les noeuds représentent les états que peut prendre la situation et dont les arcs représentent les liens entre états. Dans cette conception, chercher la solution revient à se déplacer du noeud-départ vers le noeud-but dans un espace problème qui représente l'ensemble des états que peut présenter une situation. C'est un ensemble exhaustif et objectif. L'ensemble des états du problème impliqués dans la solution optimale est appelé espace de la tâche. Si résoudre un problème efficacement consiste à limiter le nombre d'étapes entre le noeud-départ et le noeud-but, alors on peut dire que l'espace de la tâche est ce vers quoi la stratégie du sujet doit tendre. Le type de résolution que le sujet met en place peut évidemment dévier de l'espace de la

tâche. Pour éclairer ce point, Richard (1990) propose la notion d'espace de recherche. Il correspond à l'interprétation que le sujet a fait du problème et à l'ensemble des états dans lesquels la solution est recherchée¹. L'espace de recherche peut être plus étroit que l'espace de la tâche. C'est le cas lorsque l'interprétation d'un sujet comporte plus de contraintes que l'interprétation d'un expert. Cet espace peut également être plus large que l'espace de la tâche. C'est le cas d'un sujet qui considère comme licites des actions illicites.

La connaissance de ce à quoi ressemble le problème une fois résolu (le but) permet au sujet d'organiser des actions autour de cet objectif. Richard (1990) pose que la connaissance du but passe par trois étapes : la création de buts négatifs (qui représentent les états de la situation à éviter), la création de sous-buts et leur ordonnancement. Le but n'est pas à concevoir uniquement comme le produit du raisonnement, mais également comme un de ses indices. Si l'activité de raisonnement, à son début, se contente de trouver le but et les sous buts, celle-ci nécessite, durant son exécution, un feed-back à propos de son évolution. Ce feed-back peut être l'écart au but, qui fournit au sujet une information importante dans le contrôle du raisonnement (Richard, 1990 ; Amalberti, Bastien & Richard, 1995). Le but est donc important dans le raisonnement et les erreurs de terrain en sont dépendantes (Leplat, 1987).

Sur le plan fonctionnel, le raisonnement peut se concevoir comme une chaîne d'inférences dont l'objectif est de progresser pas à pas dans un espace problème vers l'obtention d'un but. Les inférences peuvent être classées selon leur nature et selon leur fonction. La classification selon la nature distingue les inférences de généralisation qui permettent de connaître le but à partir d'une action et les inférences de particularisation qui démarrent, à partir du but, une recherche pour trouver une action susceptible de mener à ce but (Richard, 1990). La classification selon la fonction distingue les inférences pour agir pour et les inférences pour comprendre. Ces dernières résultent de deux processus inférentiels : l'abstraction (qui consiste à créer une règle à partir des constantes d'une ou de plusieurs situations) et la particularisation (qui consiste à créer un cas d'application particulier d'une règle générale existante).

Les quelques auteurs cités ici à propos de la résolution de problème proposent des conceptions qu'on qualifiera de classiques dans le sens où le problème y est exposé de façon logique et canonique. On verra plus loin que les données physiques et temporelles d'une situation réelle peuvent influencer sur la nature du problème. Par exemple Sundström (1995), qui a étudié le

¹ Pour Richard (1990, p. 123), l'espace du problème est l'interprétation faite par le sujet : *"L'espace du problème est l'espace de recherche qui correspond à l'interprétation que s'est donnée le sujet"*. Pour la clarté de l'exposé, on retiendra comme définition de l'espace problème celle proposée par Newell et Simon (1972).

raisonnement dans des résolutions de problèmes dynamiques², pose que le traitement de l'information sert à catégoriser des états afin d'y associer des actions, à choisir les actions en fonction de l'état du problème et à évaluer les conséquences des actions.

1.3.2 Déduction, induction, abduction

On vient de parler d'inférences à plusieurs reprises. Il est temps de donner une définition de ce concept. Une inférence est une opération de raisonnement par laquelle une connaissance est construite à partir de données existantes. Inférer revient à mettre en relation des informations (appelées prémisses) et à construire une nouvelle connaissance non contenue dans les premières (appelée conclusion). Par exemple :

Prémisse 1 : *Jean est plus grand que Pierre.*

Prémisse 2 : *Pierre est plus grand que Paul.*

Donc : *Jean est plus grand que Paul.*

L'inférence est l'outil de base du raisonnement. La déduction et l'induction sont des modes d'inférence. Pour Caverni, Nguyen-Xuan, Hoc et Politzer (1990), elles ont pour objectif d'élaborer, à partir d'informations primitives sur l'état de l'environnement, d'autres informations sur l'état de ce même environnement par des activités intériorisées.

La déduction est une inférence dont le but est, partant d'une ou plusieurs prémisses posées comme vraies, d'obtenir une conclusion sûrement vraie. L'étude psychologique de la déduction consiste d'abord à identifier les arguments que les individus utilisent spontanément ou ceux qu'ils acceptent comme valides. Elle consiste ensuite à chercher par quels processus les sujets peuvent tirer des conclusions à partir de prémisses.

L'induction est une inférence dont le but est d'obtenir une conclusion générale, mais dont on ne peut pas toujours être sûr qu'elle sera vraie, à partir de prémisses de portée particulière posées comme vraies. L'étude de l'induction consiste à comprendre comment un sujet produit une généralisation et comment il s'assure de sa validité (Caverni *et al.*, 1990). Richard pose que le raisonnement inductif consiste en la formation d'hypothèses et la recherche d'informations pour les tester. Tous les auteurs n'ont pas la même conception de l'inférence inductive. Pour Hoc

² La notion de situation dynamique sera largement exposée plus loin. On peut en donner une définition provisoire. La dynamique d'une situation est sa capacité à changer dans le temps, avec ou sans le concours d'un

(Hoc, 1991 ; Hoc & Amalberti, 1994, 1995), l'inférence inductive conduit des effets aux causes d'un phénomène et sert à comprendre la situation. Pour ces auteurs, l'inférence inductive remonte une chaîne causale. En fait, il semble que quelle que soit l'orientation de l'inférence (vers l'amont ou l'aval), celle-ci reste déductive. Pour anticiper les effets d'une panne sur un système, l'inférence déductive est orientée vers l'aval de la panne. Pour trouver la cause d'une panne, l'inférence déductive est orientée vers l'amont des symptômes. C'est exactement ce que font les sujets expérimentaux des études de Rouse (1978) et Sanderson et Murtagh (1990) qui doivent trouver la cause de la panne de certains éléments d'un réseau formel. Ce qui définit une inférence inductive n'est pas son orientation dans le réseau causal. C'est la généralisation des traits d'un exemplaire d'une catégorie à l'ensemble de cette catégorie.

Contrairement à la déduction dans laquelle une condition hypothétique est démontrée vraie, l'abduction est une opération logique qui génère une hypothèse en premier lieu. Elle est composée d'un fait et d'une règle desquels une hypothèse peut être tirée (Peng & Reggia, 1990). L'abduction n'établit pas la vérité ou la fausseté de l'hypothèse, mais seulement sa probabilité. La forme de l'abduction est :

Le fait C est observé :	<i>Il y a de la fumée.</i>
Si A était vrai, C serait observé :	<i>S'il y avait un feu, il y aurait de la fumée.</i>
Donc, il y a des raisons de penser que A est vrai :	<i>Il y a sans doute un feu.</i>

Pour produire une inférence abductive, la base de connaissances doit contenir un ensemble d'associations entre concepts, comme le lien A-C. Boreham, Mawer et Foster (1996) associent l'abduction au modèle mental. Cette conception nécessite la construction d'une structure qui rende compte de toutes les données de la situation. Dans l'abduction, les faits observés servent à activer les conditions d'apparition de ces faits et à connaître, dans le cas d'un dysfonctionnement, les causes du problème. Cette conception implique de passer en revue un gros volume d'informations dès qu'une association A-C est trouvée à moins que l'on suppose que les conditions d'apparition des faits et les faits eux-mêmes soient associés par le sujet au travers de l'expérience.

1.3.3 Les formes de représentation des connaissances

1.3.3.1 La représentation dans le raisonnement

"Si l'on admet que notre cerveau ne sait travailler que sur des représentations, la compréhension consiste à construire la bonne représentation du monde pour l'objectif fixé" (Amalberti, 1996, p. 128). Une représentation reflète la compréhension de la situation par le sujet et supporte le raisonnement. Sa qualité dépend de la possibilité qu'elle offre de faire une bonne description de la tâche et sa capacité à catégoriser le problème posé (Amigues, 1985). Richard (1990) propose que la représentation d'un problème comporte trois composantes, auxquelles correspondent trois questions : l'interprétation de la situation initiale (le problème est-il à information complète ou incomplète ?), l'interprétation de la situation-but (à quoi ressemble le problème une fois résolu ?) et l'interprétation des actions licites (qu'est-il possible de faire ?). Une fois que le sujet dispose des réponses à ces trois questions, la situation est comprise et peut être résolue. A partir des données constituant l'énoncé du problème, la représentation est élaborée par évocation des connaissances antérieures et provoque le rappel ou la construction de procédures. La représentation peut être construite par évocation d'un schéma, par élaboration d'une structure de relations ou par un transfert à partir de procédures similaires (Spérandio, 1987). Elle peut être élaborée à la fois par des processus automatiques et par des processus contrôlés (Richard, 1995).

Ce qui vient d'être dit de la représentation relève d'une conception classique qui s'attache à définir des composantes élémentaires. La prise en compte des caractéristiques de situations de travail entraîne des auteurs à aborder les représentations sous un angle plus précis et plus orienté. Pour Rabardel (1995), les représentations concernent l'ensemble des éléments caractéristiques des situations d'activité instrumentée, en particulier les trois pôles de la triade sujet-instrument-objet, leurs interactions, les éléments du contexte pertinents pour l'action et l'action elle-même. Amalberti et Hoc (1993) considèrent que la représentation de la situation est un élément central coordinateur des activités, à la fois outil de compréhension et de guidage, mais aussi objet en perpétuelle évolution. Pour ces auteurs, la représentation a une telle importance qu'elle constitue le centre de leur modèle du diagnostic humain. Le centre de l'architecture du modèle n'est pas une suite de processus mentaux, mais un système de représentations symboliques qui supporte des anticipations, ajuste les diagnostics aux ressources disponibles et aux contraintes issues du processus en termes de possibilités d'action. Amerge et Mariné (1992) accordent sensiblement le même rôle à la représentation qu'Amalberti et Hoc (1993). L'induction d'une structure de signification implique une itération de phases d'interprétation/recherche d'informations visant à définir des buts, délimiter le problème et assurer le contrôle de la représentation. Ce contrôle

implique une activité d'évaluation de la pertinence des informations recueillies qui s'appuie sur des connaissances théoriques ou empiriques, des comparaisons avec des situations de référence et la convergence d'éléments déjà recueillis.

L'expert utiliserait de meilleures représentations du problème que le novice (Anderson, 1993 ; Amerge & Mariné, 1992). La qualité de la représentation est une des clés de l'expertise dans la mesure où elle conditionne la compréhension du problème et sa résolution. Mais cette caractéristique ne doit pas gommer le fait que la représentation est un reflet déformé de la réalité. Elle n'est pas une description exacte mais un état virtuel des données environnementales conditionné par les objectifs d'action du sujet. Elle peut comprendre une description du fonctionnement d'un système qui dévie de ce que fait réellement ce système (Tijus, Richard & Leproux, 1996). Le concept d'image opérative d'Ochanine (1978) rejoint cette conception parcellaire de la représentation destinée à la sélection des informations situationnelles plus qu'à leur complétude. On peut donner un autre exemple de l'aspect sélectif de la représentation sur le traitement de l'information. Endsley et Smith (1996) ont soumis des pilotes à une tâche de rappel. Ils doivent replacer des échos d'avions sur un écran radar. Les auteurs ont remarqué que les pilotes replacent d'abord les cibles pertinentes vis-à-vis de la stratégie développée. Ces cibles sont remplacées avec plus de précision que les autres.

Dans le cadre de la mémorisation d'informations médicales concernant des patients, Hassebrok, Johnson, Bullemer, Fox et Moller (1993) et Hassebrok et Prietula (1992) proposent une variante à la conception classique de la représentation : la LOR (*Line Of Reasoning*). Cette conception met l'accent sur l'incorporation dans la représentation du résultat de raisonnements menés sur les informations traitées. Il s'agit d'une représentation du problème du patient, un modèle possible construit de manière dynamique et basé sur des connaissances spécifiques au domaine évoqué pour le diagnostic. La LOR reflète une hypothèse ancrée dans les connaissances du domaine. Ce n'est pas une connaissance stockée. C'est le produit d'un ensemble complexe de chemins de raisonnement reliés et définis par des pathologies. Les types de connaissances qui peuvent intervenir dans une LOR sont des interprétations des données du patient, des inférences ou des explications causales et des hypothèses de diagnostic qui représentent des modèles schématiques généraux.

1.3.3.2 Les modèles mentaux

Selon Johnson-Laird (1993) et Byrne (1991) le raisonnement est un processus qui construit des modèles mentaux. La déduction utiliserait non pas des processus syntaxiques et des règles formelles mais des procédures sémantiques qui manipulent des modèles mentaux. Les

procédures sémantiques construisent des modèles de prémisses, formulent des conclusions et testent leur validité. Pour Johnson-Laird, Byrne et Shaeken (1992), plus le nombre de modèles à construire dans une déduction est élevé, plus la tâche est difficile. Un modèle mental imparfait peut se créer lorsqu'un sujet tente d'organiser un pattern d'informations complexe. Ce modèle mental peut négliger des relations du système ou inclure des relations fausses et impliquer une incompréhension du fonctionnement du système (Sanderson & Murtagh, 1990). Un modèle mental d'une prémisses est une conception de ce que serait le monde si la prémisses était vraie (Byrne & Handley, 1992). De ce point de vue, le modèle mental est un outil de simulation (Norman, 1985).

Byrne adopte la théorie du modèle mental pour étudier le raisonnement humain. Les sujets construiraient des modèles mentaux pour représenter l'information dans un ensemble de prémisses. Ils formuleraient une conclusion et vérifieraient qu'elle est valide en s'assurant qu'il n'y a pas de contre-exemple (Byrne, 1991 ; Byrne, Handley & Johnson-Laird, 1992). D'après cet auteur, la théorie du modèle mental a un plus grand pouvoir prédictif que la théorie des règles car elle permet de rendre compte de la suppression d'inférences valides de la part des sujets (Byrne, 1989). Pour Detienne (1996), l'activité de compréhension (d'un programme informatique, en l'occurrence) peut être abordée à partir de plusieurs concepts (schémas, réseaux propositionnels, modèles mentaux) mais l'auteur opte pour le dernier formalisme car il permettrait de comprendre les effets de la tâche sur l'activité de compréhension.

Soit un opérateur qui tente de connaître les conséquences d'une action sur le système dans la conduite d'un processus continu (une centrale nucléaire, par exemple). Il se déplace dans un réseau causal dont une des composantes est le temps. Pour savoir s'il peut agir ou non, il doit anticiper les effets de son action. Pour la théorie des modèles mentaux, le sujet va construire mentalement un état du système qui sera le résultat de la combinaison de toutes les prémisses. Cette anticipation peut se décomposer en sous-états enchaînés les uns aux autres et qui détaillent mentalement l'évolution de l'état du système. Le sujet applique à l'état courant du système une prémisses (l'opération envisagée, par exemple une augmentation de puissance) et obtient un modèle mental (un état virtuel) du système. Cet état est modifié par la prise en compte d'une autre prémisses (la température actuelle du cœur) et des actions qui lui sont associées (un besoin accru de réfrigérant). Ce processus de raisonnement ajoute des incréments jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de prémisses à prendre en compte. En résumé, l'opérateur crée, pas à pas, des états virtuels du système qui lui indiquent des évolutions possibles des actions menées. Cette situation d'anticipation peut être discutée dans des termes très proches dans le cadre de la théorie des règles. Pour connaître les conséquences de ses actes, l'opérateur effectue une simulation de l'état futur du système en fonction de son état présent et du résultat escompté de l'action.

La théorie des règles et celle des modèles mentaux peuvent mener à des descriptions similaires d'un même processus. Dans notre discussion, il semble que ces deux cadres théoriques puissent être utilisés pour expliquer une activité d'anticipation. Les partisans des modèles mentaux ne proposent pas de processus radicalement différent de la conception traditionnelle du raisonnement. La différence est mince si on considère que dans les deux conceptions, le sujet a besoin de représenter l'information afin de mettre à jour l'état du problème en fonction de l'avancement du raisonnement. Qu'advient-il des modèles mentaux lorsque le raisonnement concerne un problème inconnu, dont la solution nécessite l'emploi de plusieurs stratégies combinées et pour lequel la charge de travail s'additionne à une contrainte de temps ? La construction d'un modèle des prémisses pour un problème qui en compte des dizaines n'est pas un formalisme qui rend compte du principe d'économie des ressources cognitives. Si le raisonnement (le diagnostic, par exemple) comporte un modèle mental ou une représentation, ce n'est qu'à un niveau local, lorsqu'une hypothèse a été formulée et que la tâche consiste à trouver des conditions de sa vérification ou l'anticipation de ses effets. On entre ici dans des processus contrôlés de génération et de test d'hypothèse qui constituent une part seulement de l'activité de diagnostic. Dans la pratique, un opérateur qui effectue un diagnostic ne construit pas une nouvelle représentation pour chaque tâche. S'il en utilise une, celle-ci fait déjà partie d'une structure de connaissances préalable qu'il récupère et instancie. Même dans le cas d'une panne nouvelle, il tente de récupérer des connaissances propres à d'autres pannes et de les adapter au cas en cours. Cela peut être l'application d'une solution passée au cas présent. C'est la position des théoriciens du raisonnement par analogie.

1.3.4 Le raisonnement par analogie

"C'est une impulsion naturelle, quand on est confronté à un phénomène incompris, d'essayer de le relier à des choses qu'on comprend [...]" (Roediger III, 1980, p. 231). L'analogie joue un rôle extrêmement important dans la mise en oeuvre des tentatives de solution à une situation nouvelle et une grande part de notre activité cognitive dépend de l'analogie (Novick, 1988). Ce raisonnement est toujours présent dans la compréhension et une situation n'est jamais nouvelle au point qu'il n'existe aucune connaissance utile dans cette situation (Amalberti, 1996). Selon Richard (1990), si on peut établir une correspondance entre deux domaines et s'il existe une relation qui est vraie dans l'un des domaines, alors on peut faire l'hypothèse qu'il existe une relation correspondante dans l'autre domaine et rechercher cette relation. Le raisonnement par analogie se produit lorsqu'un sujet traite un problème nouveau (le problème cible) dont il a déjà résolu une forme

plus ou moins proche dans le passé (le problème source). La résolution du problème source facilite la résolution du problème cible. Cette facilitation est produite par des processus d'appariement puis de transfert, dont les objectifs sont de comparer et de transposer des représentations, des stratégies - ou toute autre information utile dans le cadre d'une résolution de problème - depuis le problème source vers le problème cible.

Le problème source (PS) est le problème duquel on attend une construction de représentation susceptible d'aider à la résolution du problème cible (PC). A ce stade, la résolution de problème se décrit en termes de représentation et d'inférence. Le nombre de PS influe sur la résolution du PC. C'est ce qu'ont constaté Catrambone et Holyoak (1989). Les sujets qui disposent de deux PS montrent une meilleure résolution de PC que les S qui ne disposent que d'un PS.

Le PC est le problème que le sujet doit résoudre en se servant de la résolution du PS, en tentant d'élaborer une représentation compatible ou identique à celle déjà construite. Ici, la résolution se décrit comme le résultat d'une mise en correspondance terme à terme des données des deux problèmes. C'est à ce niveau qu'on observe les effets de la différence de surface ou de structure³ entre le PS et le PC. La résolution du PC est la variable dépendante de l'étude du raisonnement par analogie. Sans trop entrer dans les détails, on peut avancer que les différences de surface entre un PS et un PC sont au moins aussi importantes - au yeux du sujet, en tout cas - que les différences de structure. Lors de la résolution du PC, on constate que les différences de structure entre PS et PC ne sont pas toujours détectées. Il s'ensuit une mauvaise résolution du PC. Les différences de surface sont très souvent détectées et considérées comme des différences de structure. Il s'ensuit, dans ce cas également, une mauvaise résolution du PC.

L'appariement permet de comparer les deux problèmes. Le sujet évalue la possibilité de transposer la représentation du PS vers le PC. C'est une étape très importante puisque c'est d'elle dont va dépendre en partie (l'autre partie étant la représentation du PS) la résolution du PC. L'appariement consiste à chercher dans le PC un équivalent de chaque élément du PS. Il est très dépendant des consignes données au sujet. Catrambone et Holyoak (1989) ont montré que sous certaines conditions, des consignes d'appariement précises génèrent une meilleure résolution du PC que des consignes d'appariement générales. Les indices d'appariement sont très précieux pour la résolution du PC puisqu'ils génèrent un meilleur résultat que des indices de récupération du PS (Novick & Holyoak, 1991).

³ La surface d'un problème est l'ensemble des données et valeurs qui le composent. La structure renvoie à l'organisation des données et aux opérations qu'elles impliquent lorsqu'elles sont traitées.

Le transfert est la phase terminale du raisonnement par analogie. Le sujet, après avoir comparé les données du PS et du PC, transpose la représentation du PS vers le PC. Catrambone et Holyoak (1989) affirment qu'il existe deux facteurs qui influent sur la qualité du transfert. Ils s'agit de la représentation⁴ des similarités entre PS et PC et la présence, dans le PC, d'indices de récupération des traits pertinents du PS. A ces deux facteurs, on peut en ajouter un troisième : le délai de réponse entre PS et PC. En comparant un délai de 30 mn à un délai de 7 jours, Catrambone et Holyoak ont montré que plus le temps qui sépare l'appariement du transfert est long, plus la performance lors de résolution du PC diminue. Des auteurs (Catrambone & Holyoak, 1989 ; Novick, 1988, 1990 ; Novick & Holyoak, 1991 ; Gick & Mc Garry, 1992) utilisent les notions de transfert positif et négatif. Ces deux types de transfert désignent indirectement le résultat du PC. On parle de transfert positif quand le transfert génère une réponse juste, c'est à dire quand la représentation du PS est transposable dans le PC. A l'inverse, on parle de transfert négatif quand le transfert génère une réponse fausse, c'est à dire quand la représentation du PS n'est pas transposable dans le PC. On verra plus loin que ces 2 types de transfert dépendent principalement du niveau d'expertise du sujet et des caractéristiques de surface et de structure du PS et du PC.

Les mêmes données créent une analogie de surface mais des opérations identiques supposent une analogie de structure. Une des caractéristiques essentielles du raisonnement par analogie est la détection, dans le PC, des caractéristiques de structure du PS. C'est cette détection qui va permettre d'élaborer une représentation appropriée. Les indices à partir desquels la représentation du PS est élaborée et les indices de sa récupération depuis la mémoire conditionnent la qualité du transfert. Brown et Kane (1988, cités par Novick, 1990) ont montré que des sujets qui ne parviennent pas à accéder à l'information pertinente ont du mal à considérer la recherche d'analogie comme une stratégie appropriée à la résolution de problème. Ce résultat montre que la sélection des informations à appairer est un des processus centraux du raisonnement par analogie. Si un sujet résout le PC comme le PS alors que les deux problèmes n'offrent qu'une analogie de surface, le résultat du PC sera inexact, même si le PS a été résolu correctement.

L'analogie de structure désigne les similarités de fond qui existent entre le PS et le PC. Cela signifie que si deux problèmes ont la même structure, alors ils peuvent être résolus de la même manière. La structure du problème est ce dont le sujet doit tenir compte pour résoudre le PC, même si ce n'est pas ce qu'il fait réellement. On a vu plus haut que les sujets peuvent

⁴ Mc Guinness (1986, cité par Novick, 1990) affirme que l'analogie est un transfert de représentation et que les sujets exploitent rarement la meilleure représentation d'un problème.

s'attacher plus à la surface du problème qu'à sa structure pour le résoudre. Il restait à prouver, une fois ce constat établi, que le niveau d'expertise peut moduler ce résultat. C'est ce qu'a fait Novick (1988), en faisant résoudre des problèmes de mathématiques impliquant le calcul d'un PPCM (plus petit commun multiple). Cet auteur a montré que les experts produisent un transfert positif quand les problèmes ont des structures identiques mais des surfaces différentes, ce qui n'est pas le cas des novices. Experts et novices produisent un transfert négatif quand les problèmes ont des surfaces identiques mais des structures différentes.

La saillance des traits de surface d'un problème et les erreurs qui peuvent en découler sont une des composantes de l'hypothèse théorique de cette thèse. On aura l'occasion d'y revenir.

1.3.4.1 Des conceptions divergentes

Il existe une conception du transfert analogique qui repose sur le concept de schéma. Parmi ses partisans, citons Richard (1990), pour qui un schéma est un bloc de connaissances composé de plusieurs concepts, utilisé souvent et organisé en une suite logique. Il est instanciable en fonction de la situation. Il contient une somme de connaissances déclaratives qui ne sont pas liées à une situation particulière. L'intérêt de la conception du transfert supporté par un schéma est qu'elle permet d'expliquer comment une activité de résolution de problème peut voir sa vitesse d'exécution ou sa précision augmenter. Dans une situation où un sujet doit résoudre des problèmes souvent analogues les uns par rapport aux autres, la théorie du schéma prédit l'élaboration d'une classe de problèmes, comprenant des activateurs, des procédures et des connaissances déclaratives, rassemblés dans une structure de connaissance.

Catrambone et Holyoak (1989) ont fait produire par des sujets des notes à propos des PS qui leur étaient présentés. Ils ont déduit de ces notes la qualité de la représentation que les sujets avaient construite. Ils ont ensuite comparé ces notes avec la qualité du transfert et ont remarqué que les sujets qui produisent des schémas de qualité réussissent plus souvent, dans l'ensemble, que les sujets qui produisent des schémas pauvres.

On pourrait proposer que lors de la première expérience de confrontation à une classe de problèmes, le sujet produit un raisonnement analogique "pur" dans le sens où il ne dispose pas encore du schéma de résolution de cette catégorie de problème : les données du PC sont remplacées par les données du PS jugées pertinentes. En revanche, quand il s'agit, après plusieurs présentations, de résoudre un type de problème déjà rencontré, alors les données du PS pourraient être considérées comme les activateurs d'un schéma.

Carlson et Yaure (1990) étendent l'approche de l'analogie. Bien que la procédure qu'ils emploient⁵ ne soit pas exactement celle utilisée dans les recherches classiques (voir Novick & Holyoak, 1991, par exemple), ces auteurs confortent l'importance du transfert des connaissances. L'apprentissage et l'augmentation des performances de résolution de problème qui lui est rattachée peut se concevoir comme un raisonnement par analogie fondé sur un grand nombre de problèmes source, lesquels ont permis la construction d'une structure de connaissance.

Il existe une conception qui dévie radicalement de la conception classique du raisonnement par analogie. Il s'agit de la théorie de l'amorçage de concept (Schunn & Dunbar, 1996). Cette théorie avance que la résolution d'un problème source peut faciliter la résolution d'un problème cible sans que le sujet en ait conscience, de manière implicite, peu coûteuse et relevant de processus cognitifs de bas niveau. Cette théorie est étayée expérimentalement par la procédure suivante. Les auteurs font résoudre à leurs sujets un problème source de virologie, puis un problème cible de génétique impliquant tous deux le concept d'inhibition dont les sujets ont déjà des notions dans leurs études. Les résultats montrent que les sujets chez qui le concept d'inhibition a été amorcé dans le problème source résolvent mieux le problème cible que les autres sujets. Les auteurs interprètent ces résultats sous l'angle de l'amorçage et non pas sous l'angle du transfert analogique. L'examen des protocoles verbaux donne peu de preuves qu'il y a eu appariement ou rappel du problème de virus vers le problème de génétique. Presque tous les sujets omettent de mentionner la tâche de virus dans les entretiens post expérimentaux, ce qui suggère qu'un autre mécanisme que l'analogie est à l'oeuvre. Dans les études traditionnelles sur le transfert, les sujets acquièrent un nouveau concept pendant la session expérimentale et doivent ensuite le transférer vers un autre problème. Ici, les sujets disposaient déjà du concept avant l'expérience. Il est donc possible que les sujets soient peu conscients d'une source quand celle-ci amorce un concept général. Les auteurs concluent en affirmant que lorsque les sujets n'ont pas suffisamment d'informations pour faire un appariement, la connaissance source peut avoir un effet au travers de processus de bas niveau comme l'amorçage. S'il est difficile pour les sujets d'accéder explicitement à l'information nécessaire pour générer une analogie, beaucoup des processus implicites impliqués dans le raisonnement analogique fonctionnent toujours même si une analogie explicite n'est pas trouvée.

⁵ Carlson et Yaure font étudier par des sujets des fonctions booléennes en très grand nombre et leur demandent ensuite de résoudre d'autres fonctions booléennes enchaînées. Il s'agit ici, plutôt que d'un raisonnement par analogie, d'un processus d'induction-instanciation, où le sujet construit des connaissances abstraites qu'il particularise.

L'extraction passive de traits participant à un apprentissage non conscient est abordée plus loin (1.6.7.2 Les situations d'apprentissage implicite).

1.3.4.2 L'analogie dans le diagnostic

Le raisonnement par analogie permet d'appliquer à une configuration de symptômes une solution développée auparavant pour une situation analogue. Konradt (1995) a montré que les opérateurs experts ont le plus souvent recours à une stratégie historique pour diagnostiquer une cause de problème. L'auteur suggère l'existence d'une classe de stratégies généralisées appelées "*case-based*". Dans ces stratégies, les symptômes observés dans la situation sont collectés et comparés à ceux de cas similaires. L'information observée est comparée soit à une information externe (rapports de maintenance, par exemple), soit aux connaissances de l'individu.

Les types de pannes rencontrés par les dépanneurs sont récurrents. Le mode de raisonnement est plutôt schématique puisqu'il s'agit d'associations symptômes-causes. L'analogie joue tout de même un rôle car les dépanneurs sont parfois confrontés à des pannes inconnues sur lesquelles ils passent beaucoup de temps. Dans ces cas de figure, la solution est parfois trouvée en appliquant la solution d'une autre panne et en l'adaptant à la situation en cours. L'appariement effectué dans ces conditions n'est pas aussi évident que dans les études de laboratoire. Il ne s'effectue pas terme à terme et les modifications apportées à la solution récupérée pour qu'elle s'adapte à la panne traitée sont importantes. Il s'agirait peut-être d'un transfert automatisé, activant des procédures connues qui réalisent, dans un autre contexte, un but semblable à celui en cours (Amalberti, Bastien & Richard, 1995). Ce transfert analogique se distinguerait du raisonnement analogique proprement dit par son mode de contrôle, par l'absence d'évaluation et de recherche explicite d'informations. Cette conception de la résolution de problème, basée sur un transfert automatisé repose probablement sur une extraction et un appariement de traits situationnels à une structure de connaissances, mécanisme que l'on retrouve dans l'activation d'un schéma (Cf. 1.4.5 La théorie des schémas). C'est cette conception du raisonnement (basé sur un schéma) qui est préférée ici et qui est supposée supporter la recherche d'un analogue.

1.3.5 Limites de la conception classique du raisonnement

On a vu une conception classique du raisonnement à travers la mise en œuvre d'inférences de différentes natures. Ces inférences entrent dans un cadre interprétatif de la situation-problème qui pour les uns est une représentation et pour les autres un modèle mental.

Cette conception de la résolution de problème a prévalu pendant de nombreuses années et certains des concepts sont encore utilisés. Pour autant, l'image du raisonnement qui ressort de ce chapitre n'est probablement pas celle qui prévaut actuellement dans les conceptions ergonomiques. Les inférences sont supposées être mises en œuvre dans des situations où une connaissance étendue n'existe pas encore. Ce type de situation devient de plus en plus rare au fur et à mesure que l'individu gagne en expérience et qu'il est confronté de manière récurrente à un même ensemble d'objets. Dans une telle configuration, le raisonnement canonique tel qu'on l'a vu dans ce chapitre n'est pas adapté puisqu'il implique des traitements analytiques. Tout au plus ce type de traitement sera mis en œuvre par un sujet novice bien que pour lui aussi, le recours à du connu reste une solution plus économique.

Connaître par avance la situation dans laquelle on se trouve permet de mettre en œuvre des connaissances préexistantes. C'est ce principe élémentaire qui sous-tend la performance des experts. Le format des connaissances expertes diffère radicalement de celui impliqué dans le raisonnement inférentiel. Ils diffèrent l'un de l'autre au point que l'on pourrait se demander si l'expertise ne se résume pas à une absence de raisonnement. Le chapitre qui suit ne répond pas explicitement à cette question mais permettra de recueillir certains éléments de réponse.

1.4 L'EXPERTISE

Ce chapitre est consacré à une présentation générale du concept d'expertise et à l'exposé des différentes théories : chunks, habiletés de mémoire, schémas et organisation spécifique des connaissances. Elle se termine en abordant certains points plus centrés sur les situations de travail et les opérateurs : le dépannage en situation connue ou inconnue, l'heuristique de fréquence et la variabilité. Les processus de raisonnement qui ont été présentés jusqu'ici vont être rencontrés dans des situations où le sujet maîtrise ce qu'il fait. On va s'éloigner de la conception inférentielle du raisonnement puisque les inférences sont largement minoritaires dans les raisonnements experts. On aura l'occasion de revenir sur ce point.

La performance et la vitesse de traitement dans les activités cognitives dépendent d'une multitude de facteurs. Parmi eux, l'expertise joue un rôle majeur. La fonctionnalisation des connaissances (Amalberti, Bastien & Richard, 1995), les capacités de traitement et de mémorisation, les stratégies développées sont autant de facteurs directement liés à l'expertise. Celle-ci est une dimension centrale dans les recherches menées en ergonomie cognitive. Le diagnostic, en tant que forme de raisonnement⁶, est une activité dans laquelle l'expertise occupe une place importante.

Le jeu d'échecs est très présent dans notre exposé. De nombreuses études ont été menées à son sujet car il offre de nombreux avantages tant méthodologiques que théoriques. Le jeu lui-même est répandu dans les écoles et les clubs et c'est un environnement naturel pour le joueur. De plus, il comporte un nombre de règles fini mais un nombre de configurations de jeu considérable. Pour Gobet, (1993), *"le jeu d'échecs n'offrirait que peu d'intérêt pour la psychologie s'il ne constituait pas le cas exemplaire d'un domaine complexe, dont la maîtrise nécessite plusieurs années d'expérience et d'étude"*. Les théories de l'expertise ont largement reposé sur le jeu d'échecs. Sur le plan cognitif, il représente une situation de raisonnement privilégiée dans laquelle on peut voir mises en œuvre un grand nombre de stratégies. Selon le niveau de jeu des sujets, on retrouve des modes de raisonnement présents dans d'autres situations de résolution de problème ou de travail. On fait allusion à des raisonnements automatisés basés sur des reconnaissances de patterns, typiques des experts (Getz, 1996a, 1996b) et à des raisonnements contrôlés basés sur des inférences, surtout présents dans le jeu des novices.

⁶ Le diagnostic sera approché comme une situation de travail dans laquelle un opérateur est impliqué. Il n'en est pas pour autant un thème exclusivement ergonomique.

Enfin, et cette remarque vaut probablement pour tous les domaines d'activité, les experts ne montrent pas de talents particuliers en dehors de leur domaine d'expertise. Si les maîtres aux échecs, par exemple, ont de grandes capacités pour retenir des positions de jeu, ils ne montrent pas de performances exceptionnelles pour une activité en dehors de leur domaine d'expertise (Hunt, 1992).

1.4.1 Présentation

L'expertise est une notion qui désigne le niveau de compétence d'un sujet dans un domaine qui lui est familier et pour lequel l'organisation des connaissances s'est transformée pour favoriser la performance et l'économie des ressources cognitives. Sur le plan structural, l'expertise se traduit par un format de connaissance spécifique au domaine (Fouet, 1997) (un schéma, par exemple) et qui permet au système de traitement de l'information, pourvu qu'il dispose des entrées nécessaires, de fournir des sorties fiables avec une charge⁷ cognitive réduite. Pour Schanteau (1992), les constantes de l'expertise sont une spécificité au domaine d'activité, des étapes de développement et une automatisation du raisonnement. La fiabilité des productions cognitives de l'expert repose sur l'expérience. Ce sont les traitements répétés d'une même tâche qui permettent de construire une structure capable d'associer une sortie (une réponse) à une entrée (la représentation d'un problème) de manière automatisée⁸ et rapide. C'est le constat que font Lesgold, Glaser, Robinson, Klopfer, Feltovitch et Wang (1988). Les radiologues expérimentés parviennent à déclencher un schéma interprétatif en très peu de temps. Le dispositif expérimental de ces auteurs prévoyait la présentation d'un cliché pendant deux secondes à l'issue desquelles le radiologue devait avancer une ébauche de diagnostic. Les données montrent que les experts parviennent à activer des connaissances pertinentes dans ce laps de temps. Les auteurs constatent également une différence d'orientation de l'attention dans le cliché entre les différents niveaux d'expertise. Getz (1996a) fait ce même constat à propos des maîtres aux échecs. Les experts se différencient des autres joueurs par l'endroit où commence l'exploration de l'échiquier et non par l'ampleur de cette exploration. Les expertises à forte composante visuelle comme l'interprétation de clichés radiologiques ou le jeu d'échecs semblent avoir en commun une exploration efficace de l'environnement.

⁷ La charge représente les effets d'un travail particulier sur l'opérateur. Elle se rapporte à la capacité limitée de traitement de l'information (Bollon, 1991 ; Bloch, Chemama, Gallo, Leconte, Le Ny, Postel, Moscovici, Reuchlin & Vurpillot, 1991).

⁸ Cette association entrée-sortie est automatisée et non automatique : elle est construite.

L'automatisation du traitement permet à l'expert de conserver libre la capacité de la mémoire de travail (Baddeley, 1992) et de traiter l'information avec une charge réduite. C'est ce qu'a constaté Bisseret (1970) chez les contrôleurs de la navigation aérienne. Lorsque la charge augmente (c'est-à-dire lorsque le nombre d'avions à traiter augmente), les contrôleurs doivent continuer à dialoguer avec les pilotes. Les experts parviennent à résister à l'augmentation de la charge en diminuant le temps de communication et la longueur des messages proportionnellement à l'augmentation du trafic afin de conserver un nombre de messages constant. Bisseret qualifie le type de mémoire mise en oeuvre dans cette tâche d'opérationnelle. Elle est *"organisée et structurée par les processus de travail"* (p. 1).

Tôt dans la pratique, toutes les informations nécessaires au traitement de la tâche doivent être traitées sur le mode contrôlé. Lorsque l'habileté augmente, la connaissance de la tâche réduit le besoin de contrôle et libère partiellement la mémoire de travail. Après une pratique intensive, les traitements automatisés suffisent à manipuler l'information pour effectuer la tâche. Ils permettent une réduction du nombre de pas dans la résolution de problème et une réduction du temps d'exécution pour chaque pas (Carlson & Yaure, 1990). Le rapport à l'action entretenu par l'expertise est essentiel pour sa construction et sa mise en oeuvre. L'expertise est construite par l'action et pour l'action. La construction par l'action renvoie à l'apprentissage qui peut se faire via la pratique répétitive d'une tâche et l'extraction plus ou moins explicite de traits pertinents de cette tâche (voir 1.6.7.2 Les situations d'apprentissage implicite), par une formation ou encore par une simulation (Johnson & Rouse, 1982b). La construction pour l'action renvoie à l'idée que les compétences sont finalisées. Elles sont organisées en unités coordonnées pour la réalisation d'un objectif, d'une tâche ou d'une classe de tâches (Leplat, 1991). C'est la position défendue par Spérandio (1987). L'articulation entre les connaissances de l'opérateur et l'activité est interactive. Les connaissances participent au guidage de l'activité et celle-ci, en retour, fait partie des facteurs intervenant dans l'acquisition des connaissances. La mise en oeuvre des connaissances est le résultat d'un compromis entre ce que l'opérateur a fait dans le passé et l'objectif qu'il doit satisfaire dans sa tâche. L'objectif agit comme un critère de sélection des connaissances. Ohlsson (1996) détaille le processus de sélection des connaissances en prenant l'exemple des règles. Chaque règle est associée à une force qui reflète son usage passé. La probabilité de sélection d'une règle est fonction de sa force. Si les erreurs sont causées par des règles trop générales, alors acquérir une habileté consiste à spécialiser les conditions d'application de ces règles en ajoutant des informations à propos de l'environnement de la tâche. Pendant l'apprentissage, la règle devient de plus en plus spécialisée et elle deviendra active dans un nombre de cas de plus en plus restreint. Finalement, la règle est activée seulement dans les situations dans lesquelles l'action qu'elle évoque est la bonne chose à faire.

1.4.2 Etats discrets ou continuum ?

L'expertise est souvent présentée comme un concept binaire. Pourtant, elle ne se réduit pas à un simple clivage expert/novice même si une telle dichotomie est expérimentalement utile. Il existe des types d'expertise qualitativement différents et "*la diversité des connaissances humaines, tant dans leurs structures que dans leurs fonctionnements ne sont pas réductibles à une simple opposition expert / novice*" (Dubois, 1992, p. 10). Cependant, dans les tâches à forte expertise il est difficile de proposer quoi que ce soit sur le comportement des opérateurs sans partager cette expertise en niveaux (Christol & Mazeau, 1991). Les niveaux d'expertise discrets tels qu'ils sont présentés dans la littérature ne reflètent probablement pas le continuum que constitue l'acquisition des connaissances et la construction d'une compétence. Cette simplification peut trouver son origine dans la structure même de la procédure expérimentale où la notion de comparaison implique une discrimination. On peut citer quelques exemples de ce découpage qui ne sont qu'un échantillon non représentatif d'une tendance très forte en psychologie. Simpson et Gilhooly (1997) étudient l'expertise dans le diagnostic médical. Au niveau le plus bas, les novices n'ont que peu de connaissances en biologie et en ce qui concerne les maladies. A un niveau intermédiaire, les sujets ont acquis des connaissances causales liées à des types de maladies. Au niveau le plus haut, les experts ont compilé leurs connaissances biomédicales en des liens indices-diagnostic ou en des modèles causaux simplifiés. Schanteau (1992) propose également un découpage de l'expertise en trois niveaux. Le naïf représente le plus bas niveau d'expertise. Ce sujet n'a pas d'habileté dans un domaine particulier. Au niveau supérieur se situe le novice qui dispose d'habiletés et de connaissances intermédiaires (voir également Fisher, 1991). Son fonctionnement cognitif est qualifié de "sub-expert". L'expert est le sujet qui dispose des connaissances et des habiletés permettant d'atteindre le niveau de performance optimal.

Sur le plan théorique, il reste à développer une conceptualisation des structures de connaissances avec un accent sur l'accessibilité plutôt que sur la simple présence ou absence des connaissances. Il reste également à découvrir pourquoi des sujets d'un niveau d'expertise intermédiaire possèdent les connaissances pertinentes mais sont incapables de les utiliser dans beaucoup de situations de diagnostic (Custers, Boshuizen & Schmidt, 1996). Une alternative à une conception binaire de l'expertise est proposée par Amalberti (1997) pour qui les connaissances de l'opérateur sur un système ne sont pas homogènes. Face à un environnement complexe, des "îlots" d'expertise côtoient des zones d'ignorance de certaines sous-fonctions du système. L'existence d'un type d'expertise hétérogène peut permettre l'apparition de performances dégradées dans un domaine qui est pourtant celui de la compétence de l'opérateur.

1.4.3 La théorie des chunks

L'expertise augmente le volume d'information rappelé. Chase et Simon (1973) ont montré que dans une tâche de rappel d'une configuration de jeu réelle, les experts aux échecs replacent plus de pièces que les novices. Ceci est dû à l'habileté qu'a l'expert à traiter l'information en unités contractées (chunks) et à utiliser les règles du jeu pour encoder un pattern perceptif. Les règles qui régissent le jeu d'échecs servent à la mémorisation. Si l'information contenue dans le jeu ne répond plus aux règles connues, alors la performance de rappel des experts chute au niveau de celle des novices. La théorie des chunks et la méthodologie employée par Chase et Simon ont inspiré d'autres auteurs. Le paradigme de la modification des règles sous-tendant la nature et l'emplacement des données a été appliqué à d'autres situations que le jeu d'échecs. Les résultats obtenus ont parfois modulé et souvent confirmé les résultats de Chase et Simon.

Vicente (1992) a constaté que des experts dans le contrôle d'une simulation d'usine thermo-hydraulique mémorisent mieux les situations de panne que les novices. Les contraintes situationnelles relatives à l'encodage des paramètres de la situation de panne permettent aux experts de structurer le matériel qui leur est présenté. Pour eux, la panne comporte un ensemble de traits caractéristiques qui sont mémorisés comme un tout. Plus il y a de contraintes, plus il y a un avantage pour l'expertise. Vicente montre que si seules quelques règles de fonctionnement (équivalentes aux règles du jeu d'un joueur d'échecs) sont rendues aléatoires, alors le reste de cohérence qui subsiste dans le système suffit aux experts pour montrer des performances de mémorisation supérieures à celles des novices. Barfield (1986) constate une meilleure performance de la part des experts dans le rappel de lignes de programme informatique. La performance de rappel augmente avec l'expérience. Pour cet auteur, c'est le chunkage qui est responsable de la différence expert-novice. Barfield a proposé à ses sujets une tâche de rappel dans laquelle l'enchaînement des blocs de code du programme est rendu aléatoire. Le chunk le plus important du programme est rappelé par la majorité des experts quelle que soit sa place. Soloway, Adelson et Ehrlich (1988) font remplir la ligne manquante d'un programme informatique à des experts et des novices. Ces auteurs constatent que lorsque le programme à compléter viole les conventions de programmation, notamment en incluant des lignes de code inutiles, les performances des programmeurs avancés chutent au niveau de celles des programmeurs novices. Frensch et Sternberg (1989) font jouer des parties de bridge à des joueurs experts et non experts. Ils constatent que des modifications des règles du jeu perturbent les experts. Ceux-ci perdent plus de parties que les non experts. Les auteurs concluent que les difficultés qu'ont les sujets avec les changements de règles s'expliquent en termes de niveau

conceptuel de traitement contrairement aux modifications de forme qui touchent le niveau d'encodage. Une réorganisation perceptive et des changements de stratégie ont souvent été rapportés à propos du développement de l'expertise. Avec l'expérience, les sujets perçoivent des ensembles comme des unités et non comme une somme d'éléments. C'est probablement la marque la plus importante de la transition du novice à l'expert (Halpern, 1990). Cet ensemble de résultats incite certains auteurs à affirmer que les experts sont influencés par la structure des données environnementales contrairement aux novices qui sont influencés par la forme (Hardiman, Dufresne & Mestre, 1989). Smith (1992) fait le même constat à propos de la catégorisation de problèmes de génétique. Les sujets expérimentés (des enseignants) utilisent les procédures à appliquer pour résoudre le problème alors que les novices (des étudiants) se basent sur le contenu verbal du problème. Ces résultats amènent les auteurs à affirmer que les erreurs de catégorisation sont probablement à l'origine des erreurs de résolution des problèmes. Zajchowski et Martin (1993) consolident la position de Hardiman, Dufresne et Mestre (1989) et notent que les experts tendent à organiser leurs connaissances par les concepts alors que les novices tendent à les organiser sur la base des traits de surface. Cette position tranchée reflète partiellement la réalité. Si l'on reprend l'exemple de l'expérience de Chase et Simon (1973), le novice et l'expert encodent un pattern de traits de surface sur l'échiquier. On peut même avancer que l'expert utilise plus de traits de surface que le novice dans certaines situations de raisonnement à forte composante visuelle. Dans le cas du diagnostic médical par exemple, les experts utilisent plus d'informations contextuelles que les novices (Boshuizen, Hobus, Custers & Schmidt, 1991) et passent plus de temps à lire les données lorsque celles-ci sont présentées de manière aléatoire (Norman, Brooks & Allen, 1989). Blessing et Ross (1996) ont montré que des étudiants en mathématiques sont gênés par la forme de l'énoncé d'un problème. Si le problème à résoudre ne présente pas un énoncé typique de sa classe, alors les sujets sont moins précis et mettent plus de temps à traiter le problème. En revanche, si le contenu du problème est consistant avec son type, l'énoncé n'est même pas lu entièrement. Les auteurs concluent à une attractivité de la surface du problème, même si la fiabilité du résultat n'est pas garantie. L'interprétation de l'expertise qui est avancée ici concerne une stratégie d'encodage. Elle reposerait en partie sur une structuration des informations contextuelles par les connaissances que le sujet a sur la configuration des données.

Notre mémoire de travail a une capacité limitée (Miller, 1956) et peut montrer quelques variations interindividuelles (Engle, Carullo & Collins, 1991). Si chaque bit de mémoire contient non plus un élément mais la référence d'une organisation d'informations élémentaires (un chunk) la mémoire de travail devient un répertoire d'informations qui peut appeler un grand volume de données (Léonard, 1988). Plutôt que de maintenir en mémoire de travail des informations utiles à

la tâche en cours, le chunk transforme cette mémoire en un carnet d'adresses qui correspondent à des emplacements d'informations. Le chunkage est à la base de la théorie de l'expertise de Gobet et Simon (1996a, 1996b). Pour ces auteurs, l'expertise aux échecs repose sur des mécanismes perceptifs. Elle est le produit de chunks perceptifs reconnaissables et très spécifiques. Une condition nécessaire mais non suffisante pour qu'apparaisse l'expertise serait la possession d'un grand nombre de coups reliés à des patterns spécifiques. Selon ces auteurs, les experts aux échecs disposent de chunks spécifiques aux positions de jeu rencontrées. Gobet et Simon avancent le concept de patron (*template*) pour expliquer la performance mnésique des maîtres aux échecs. Selon eux, les patrons sont des chunks dans lesquels existent des cases (*slots*) où des informations supplémentaires peuvent être stockées rapidement. Les patrons, qui décrivent les positions que génèrent les ouvertures de parties et qui sont familiers aux maîtres et experts, contiennent des informations fixes (une douzaine de pièces) et des cases qui servent de variables. Des informations supplémentaires peuvent être insérées rapidement dans les cases à propos d'une position appartenant au patron. Dans cette théorie, il existe une structure mnésique capable d'encoder des informations standard et qui peut également prendre en compte des variantes situationnelles. Simon cite une stratégie d'encodage de Gobet qui consiste à apparier des configurations de jeu à des phases de parties célèbres. Cette stratégie revient à intégrer une variable dans une structure déjà existante.

Custers, Boshuizen et Schmidt (1996) proposent un mécanisme d'encodage semblable au patron en ce qui concerne l'information médicale : le script⁹. Les auteurs présentent les scripts de maladie comme des ensembles pré-compilés de connaissances cliniques et de diagnostic décrivant une séquence générale d'événements à laquelle on peut s'attendre quand un patient souffre d'une maladie donnée. Le script contient des informations pertinentes à propos d'une maladie, ses signes et symptômes, les conditions d'apparition, des informations à propos des causes des symptômes et la plainte du patient. Le script se développe grâce à l'expérience et sa structure se modifie avec elle. Les scripts deviennent plus riches, plus raffinés et plus adaptés à la pratique, en même temps que les connaissances causales et biomédicales deviennent plus encapsulées en fonction de l'expérience avec une certaine classe de maladies (Boshuizen *et al.*, 1991). Les scripts seraient activés comme un tout et instanciés par les données disponibles dans le cas en cours. L'instanciation du script consiste à remplacer les valeurs par défauts par des caractéristiques du patient.

⁹ A l'origine, ce concept est dû à Shank et Abelson (1977).

1.4.4 Habiletés de mémoire et mémoire de travail à long terme

Les théories des habiletés de mémoire et la théorie de la mémoire de travail à long terme n'accordent pas autant d'importance à la mémoire à court terme (MCT) que celle de la théorie des chunks. Dans ces théories, l'accent est mis sur l'encodage et le décodage en mémoire à long terme (MLT). Dans la théorie des habiletés de mémoire (Ericsson & Staszewski, 1989), l'expert a la capacité de stocker en MLT des quantités d'information qui dépassent de loin les capacités de la MCT, avec une rapidité et une fiabilité qui sont normalement associées à cette dernière. Le meilleur rappel de l'expert par rapport au novice s'expliquerait par l'encodage de l'information en MLT sous une forme accessible. L'habileté de mémoire reposerait sur trois mécanismes. Le principe d'encodage signifiant (a) pose que l'expert encode l'information sous une forme signifiante, sur la base des expériences passées. Le principe de structure de recherche (b) pose que l'information est stockée selon des indices dans le but de retrouver l'information efficacement. Le principe d'accélération (c) pose que les vitesses d'encodage et de décodage augmentent avec l'expérience, de sorte qu'elles atteignent celles de la MCT. Plus récemment, Ericsson et Kintsch (1995) ont complété la théorie des habiletés de mémoire par le concept de mémoire de travail à long terme (MTLT). L'idée est que la MLT est utilisée comme une extension de la mémoire de travail à court terme. Des sujets peuvent acquérir une MTLT et étendre leur mémoire de travail pour une activité particulière. La MTLT est supportée par un schéma dans lequel les informations stockées en MLT sont associées à des indices de récupération. Le mécanisme de la MTLT repose sur une récupération d'informations stockées en MLT. Cette récupération est basée sur l'activation d'indices présents en MCT. Les théories des habiletés de mémoire et de la MTLT rendent compte des capacités de mémorisation expertes en laissant une place à la possibilité d'une capacité non limitée. Certaines formalisations de la psychologie cognitive tentent de modéliser l'être humain en incluant des limites à ses capacités de traitement. On peut citer la très fameuse recherche de Miller (1956) ou la théorie de la charge de travail. Ces formalisations font l'hypothèse de l'apparition de difficultés de traitement lorsque le nombre d'informations à traiter augmente. La théorie des habiletés de mémoire contourne en partie ce problème en étendant les capacités de traitement de la mémoire de travail à la MLT.

Sur le plan théorique, la théorie des chunks et la théorie des habiletés de mémoire sont construites sur la base d'hypothèses de traitement différentes. Pour la théorie des chunks, la capacité de traitement est liée à la contraction de l'information. C'est la transformation de l'information qui est à l'origine de l'extension de la capacité de traitement. Pour la théorie de la MTLT, il s'agit plutôt de mettre l'accent sur une modification structurale de la mémoire. La

capacité de traitement augmente grâce à la conversion d'une mémoire de stockage à des fins de traitement.

On vient de voir que la mémoire joue un rôle-clé dans certaines conceptions de la performance experte. D'autres formalisations reposent sur le format des connaissances. C'est le cas de la théorie des schémas qui partage avec l'expertise aux échecs le fait que la performance repose en partie sur des processus d'extraction de traits situationnels.

1.4.5 La théorie des schémas

"Les schémas sont au centre de toutes les théories modernes sur la compréhension et sur la planification. Ils sont aussi à la base de l'économie des ressources liée à l'automatisation des comportements" (Amalberti, 1996, p. 86). Ce sont des structures génériques de haut niveau qui sous-tendent tous les aspects des connaissances et des habiletés humaines (Reason, 1990). Le schéma est un concept qui est attribué à Minsky (1975), sous le nom de *frame*. Une première approche du schéma pourrait s'apparenter au courant Piagétien. Celui-ci affirme que le schéma (le *schème*, dans la théorie Piagétienne) est ce qui reste d'une action et qui fait qu'elle est répétable. Ce schème d'action pourrait fonctionner pour sa propre construction sans que soient nécessaires d'autres sources de motivation (Danset, 1988). L'objectif de cet auto-renforcement pourrait être un meilleur contrôle de l'activité et une orientation de la connaissance vers l'utilisabilité, la fonctionnalité. De ce point de vue, les connaissances fonctionnalisées de l'expert ne seraient pas le résultat de l'expertise mais la conséquence de la mise en œuvre d'un processus plus général de construction des connaissances chez l'homme (Bastien, 1997) potentialisé par des années de pratique dans un domaine d'activité.

Le schéma est un concept voisin mais différent du schème puisqu'il a un rapport à l'action moins direct. Il est utilisé pour résoudre des problèmes et, plus généralement, pour traiter des situations familières. La composante sensori-motrice du schème est en partie évacuée. Un schéma est un bloc de connaissances organisées, complexe et instanciable (Richard, 1990). Il contient à la fois un savoir et la manière de l'utiliser (Guillevic, 1991). Il comporte un domaine d'application défini par les activateurs dont il a besoin pour se déclencher, une procédure composée d'un plan instanciable selon les besoins de la situation en cours et une connaissance du but (Bastien, 1992). Ce dernier point intègre l'expérience du sujet, variable essentielle dans la conduite des activités routinières. Un schéma est un ensemble d'instructions pour résoudre des problèmes. Dans beaucoup de cas, il inclut des valeurs par défaut qui sont utilisées si la valeur d'une donnée ne peut être déterminée (Hunt, 1992) et une amplitude de tolérance à l'intérieur de laquelle les

corrections ne sont pas nécessaires (Amalberti, 1996). Dans certains cas, le schéma ne peut pas être appliqué directement. Son application nécessite des transformations qui ont pour but d'adapter ses caractéristiques générales aux spécificités de la situation en cours. On parle alors d'instanciation ou de particularisation. Selon Van Elslande (1992), les schémas permettent à la fois de diriger la recherche des informations supposées pertinentes et de produire les informations manquantes lorsque les données de la situation perçue sont lacunaires. En tant qu'unités structurées de connaissances, les schémas vont permettre de traiter rapidement les situations stéréotypées de la vie quotidienne pour lesquelles on pourrait agir de façon quasi automatique à partir de leur identification. Les schémas n'ont pas tous le même poids. Ils présentent un seuil en fonction duquel leur action peut se déclencher plus ou moins facilement. Certains schémas qui ont été plus souvent et plus récemment utilisés dans certains contextes, auraient tendance à maintenir un potentiel de déclenchement plus élevé que d'autres.

Van Elslande (1992) et Konradt (1995) insistent sur l'appariement indice-action chez l'expert. Le déclenchement de l'action est lié à l'extraction de déclencheurs dans la situation. Les traits de surface jouent ce rôle de déclencheurs et peuvent être à l'origine d'erreurs car le comportement basé sur les habiletés est sur-appris. Il n'y a pas d'analyse explicite de la signification des données situationnelles. Ce type de traitement automatisé se rencontre entre autres chez le joueur d'échecs. Celui-ci extrait les positions des pièces sur l'échiquier et les apparie à un schéma de jeu activé depuis la MLT (Getz, 1996b).

Ohlsson (1993) adopte une position théorique particulière en faisant l'hypothèse d'une classe de schémas abstraits, sans attributs. Cette classe de schémas aurait trois représentants : les schémas descriptifs (qui incluent les classifications hiérarchiques tels que les arbres généalogiques, les réseaux sémantiques, etc.), les schémas explicatifs (qui incluent les relations de cause à effet) et les schémas compositionnels (qui rendent compte d'un phénomène en le décomposant en composants plus simples). Les schémas abstraits, pour cet auteur, n'ont pas d'attributs et ne peuvent pas être activés par une information perceptive. Ils seraient activés "de l'intérieur" par un "agenda" stocké en mémoire. Lorsqu'une situation doit être comprise, la structure logique des données situationnelles déclencherait un des trois types de schémas. Un schéma abstrait pourrait être apparenté à un programme chargé de compiler des données en un ensemble cohérent cognitivement interprétable.

1.4.6 Les partisans d'une organisation spécifique des connaissances

Robbins, Anderson, Barker, Bradley, Fearnlyhough, Henson, Hudson et Baddeley (1996) ont étudié la mémoire des joueurs d'échecs. Pour ces auteurs, il faut chercher une explication à la diversité des habiletés aux échecs dans les variations des fonctions cognitives plutôt que dans la mémoire de travail. Un bon candidat est le processus qui contribue à l'organisation de la connaissance en MLT. L'expertise reposerait plus sur une mémoire sémantique élaborée que sur un processus de raisonnement général (Posner, 1988). C'est l'organisation des connaissances de l'expert qui lui confère sa puissance de traitement (Robbins *et al.*, 1996), en tant que facteur critique dans l'expertise (Custers, Boshuizen & Schmidt, 1996). Fink et Lusth (1987) proposent que les experts ont trois types de connaissances. Un premier type concerne des connaissances du sens commun, à propos des propriétés du monde. Un deuxième type concerne des connaissances fondamentales dans le domaine que l'expert acquiert au début de la construction de l'expertise et dont le novice dispose. Un dernier type concerne des connaissances expérientielles (Fink et Lusth, 1987), basées sur des résolutions répétées qui fournissent des raccourcis au travers du savoir et permettent à l'expert de résoudre les problèmes plus vite et plus précisément que le novice. Ces connaissances peuvent être apparentées aux raccourcis de Rasmussen (1986, 1993a).

Afin de tester l'hypothèse d'une organisation spécifique des connaissances chez l'expert, Hassebrok, Johnson, Bullemer, Fox et Moller (1993) font mémoriser puis résoudre un cas de médecine à des sujets novices, expérimentés et experts. Le délai de rappel est d'une semaine. Lors du rappel, ils constatent que les experts rappellent moins d'items que les novices. Cependant, les hypothèses et interprétations produites pendant la résolution de problème sont mieux retenues chez les experts que chez les autres sujets. Les experts semblent inclure dans le matériel rappelé des éléments de leur expérience en diagnostic, en plus du matériel présenté. La meilleure mémorisation des experts pourrait être supportée par une représentation de meilleure qualité (Wiedenbeck & Fix, 1993).

1.4.6.1 Organisation des connaissances et performance : Le formalisme largeur-profondeur

Zeitz et Spoehr (1989) font dépanner un programme de pilotage d'un robot fictif à des sujets qui reçoivent deux types d'apprentissage (voir Figure 4). Dans un cas, ils reçoivent un apprentissage "en profondeur" (P). Chacun des éléments du système est expliqué de manière séquentielle. Les fonctions remplies par ces sous-systèmes sont ensuite expliquées. Enfin, après que tous les sous-systèmes sont présentés, une vue d'ensemble du système est donnée. Dans l'autre cas, les sujets reçoivent un apprentissage "en largeur" (L). La présentation du système

commence par une vue d'ensemble. La fonction de chaque sous-système est présentée. La présentation se termine par les composants de bas niveau. Les résultats montrent que les sujets L ont de meilleures performances de dépannage. Lorsqu'on demande aux sujets de classer les pannes, les sujets L proposent une classification flexible, moins centrée sur le matériel d'apprentissage que les sujets P. Les auteurs proposent que les sujets L ont acquis une base de connaissances organisée hiérarchiquement qui a évolué vers une représentation procédurale alors que les sujets P ont reçu un apprentissage moins utilisable. Les auteurs concluent que la formation d'une représentation experte implique une réorganisation des connaissances, la formation d'associations entre différents niveaux d'abstraction du système et la difficulté à verbaliser les connaissances. Les résultats expliquent en partie les performances de traitement des experts en montrant que la présentation en largeur d'un matériel à mémoriser et la structuration qui en résulte augmente la performance de résolution de problème.

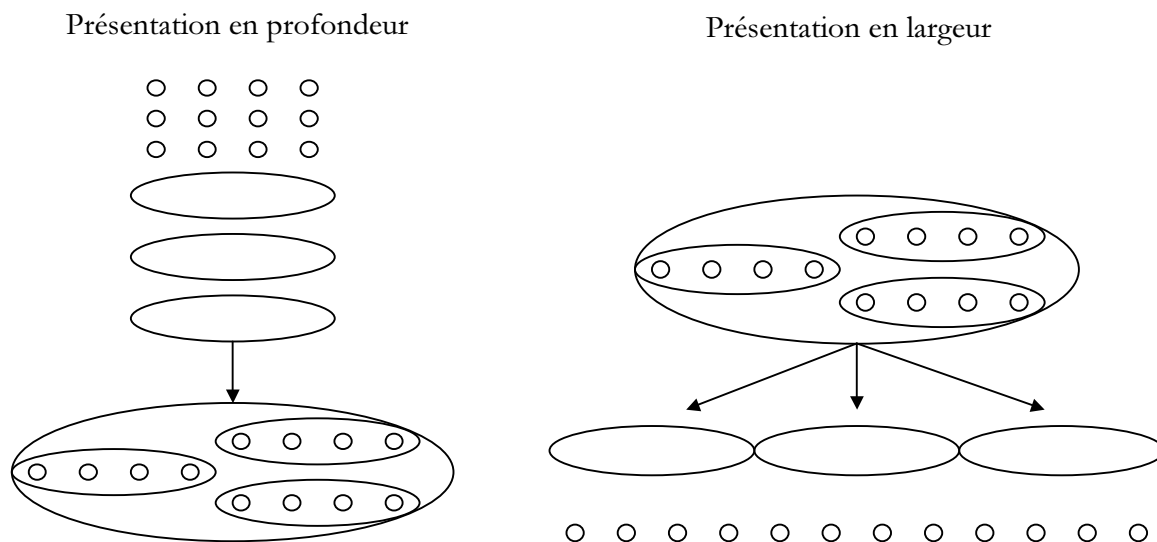


Figure 4 : Représentation des types de présentation utilisés par Zeitz et Spoebr (1989)

La performance experte serait supportée par une organisation procédurale des connaissances (Zeitz et Spoebr, 1989) et par l'évitement d'hypothèses qui entraîneraient le diagnostic vers une recherche en profondeur (Vessey, 1985).

Les experts disposent de stratégies de niveaux de généralité différents. Elles ont la forme et non la substance du raisonnement de l'expert du domaine. Cela permet à l'expert extra-domaine d'aborder le problème de manière aussi structurée que l'expert du domaine, même si les solutions proposées sont plus pauvres (Schraagen, 1993).

1.4.6.2 Des processus automatiques sous contrôle

Il existe une théorie selon laquelle un processus automatique, même d'un très bas niveau (un réflexe, par exemple) peut voir son déclenchement influencé par des processus attentionnels. Logan (1989), l'auteur de cette théorie, rapporte des résultats selon lesquels un réflexe (le clignement, en l'occurrence) peut être modifié par l'attention. Plusieurs recherches de ce type conduisent l'auteur à supposer que si des réflexes innés comme le clignement peuvent être modifiés par l'attention, a fortiori, les "réflexes appris" comme les traitements automatisés, ne peuvent être indépendants de l'attention. Si le stockage est inévitable dès lors qu'il y a attention, la récupération, en revanche, peut être contrôlée. Dans la mesure où c'est la récupération en mémoire d'informations stockées qui sous-tend les processus de traitement automatisés, Logan conclut que l'influence de processus contrôlés sur la récupération (refuser tout ou partie des informations récupérées, par exemple) est une preuve que les traitements automatisés peuvent être contrôlés. Ce que l'auteur entend par processus automatisés, ce sont essentiellement les récupérations d'informations depuis la mémoire. Il propose que si on peut agir sur la récupération de ces informations par des processus contrôlés, on aura démontré que les processus automatisés sont soumis à un contrôle. Il semble que seuls les indices de déclenchement des procédures de traitement automatisés puissent être perturbés. Cela n'implique pas que le déroulement des automatismes lui-même est perturbé. Seules la récupération des traces en mémoire et l'extraction des indices situationnels de déclenchement peuvent être soumises à un contrôle. Les effets des interférences proactives et rétroactives ont montré que la récupération d'informations stockées en mémoire peut être influencée par des tâches contrôlées. Cela ne signifie pas que les traitements automatisés sont contrôlés.

1.4.7 Problèmes connus et problèmes inconnus

Les experts reconnaissent des patterns spécifiques de données et les utilisent pour identifier rapidement un ensemble de solutions possibles. C'est ce que fait le radiologue expert face à un cliché (Lesgold *et al.*, 1988), le cardiologue face à un tracé d'électrocardiogramme (Simpson & Gilhooly, 1997) ou encore le joueur d'échecs devant une configuration de jeu (Getz, 1996a). Ces sujets recherchent un ensemble de traits qui peut être rapproché du nom d'une maladie (dans le cas des médecins) ou d'une phase de jeu connue (pour les joueurs d'échecs). Dans le domaine de la programmation informatique, les associations symptôme-cause d'une part et la connaissance du code d'autre part expliquent une part importante de l'expertise. Les experts

commettent peu d'erreurs et parviennent à les corriger rapidement alors que les novices commettent plus d'erreurs et consacrent la moitié de leur temps de programmation à les corriger (Allwood & Björhag, 1990). La différence de performance entre ces deux catégories de sujets repose probablement sur la connaissance du type d'erreur commise à tel ou tel endroit du programme, ce qui permet à l'expert de travailler dans des configurations connues pour lesquelles des réponses adaptées aux erreurs éventuelles existent indépendamment de l'apparence du programme (Ye & Salvendy, 1996).

Les réponses d'un sujet expert à la majorité des événements de son domaine de compétence proviennent de règles pré-compilées ou de plans de réponse (Gaba, 1991). Cette méthode est utilisée par des sujets qui ont fait l'expérience d'un grand nombre de problèmes dans une tâche particulière (Reed & Johnson 1993). Cette extraction des indices de la situation qui activent automatiquement des connaissances témoigne d'une réorganisation des connaissances et de l'application du principe d'économie des ressources. Les sujets activent rapidement des informations et uniquement celles qui sont pertinentes pour le cas en cours. Le besoin d'effectuer des décisions rapides favorise des méthodes de diagnostic basées sur la reconnaissance plutôt que sur l'explication en termes de processus sous-jacents (Simpson & Gilhooly, 1997). C'est le constat que font Boshuizen et Schmidt (1992) dans le cas du diagnostic médical. Les experts utilisent peu de leurs connaissances biomédicales pour établir un diagnostic. Celui-ci repose principalement sur l'observation des signes cliniques auxquels ces sujets relient des causes possibles. Cependant les connaissances biomédicales des experts ne sont pas devenues rudimentaires. L'analyse des verbalisations montre que l'augmentation du niveau d'expertise est associée à de meilleures connaissances biomédicales même si celles-ci ne sont pas mises en œuvre lors du diagnostic. De meilleures connaissances abstraites chez les experts ont également été remarquées par Ye et Salvendy (1996) dans le contexte de la programmation informatique. Ce constat porte particulièrement sur les niveaux conceptuel et fonctionnel¹⁰ du programme qui sont ceux permettant respectivement la compréhension du fonctionnement général du programme et son codage.

Belie et Parise (1993) différencient deux types d'expertise. Le premier type concerne une expertise rigide, qui se construit à partir de l'utilisation d'un outil (et peu de connaissances sur les objectifs de la tâche). Ce type d'expertise est particulièrement efficace lors de situations habituelles. Le deuxième type concerne une expertise flexible qui se construit compte tenu des objectifs de travail, pour lesquels l'opérateur recherche les moyens qu'il va pouvoir mettre en œuvre à l'aide de l'outil. Ce type d'expertise est plus efficace en situation inhabituelle, lors de la

¹⁰ Pour une vision d'ensemble des différents niveaux d'abstraction, voir Rasmussen (1986).

recherche des objectifs de l'action. Pour Liu (1991), en diagnostic de panne, les hypothèses s'obtiennent en comparant les symptômes à l'expérience dans le diagnostic. Si le cas présent est similaire à un cas passé, le résultat du jugement passé servira d'explication au cas présent. En reliant les symptômes à des hypothèses, l'expérience réduit l'ensemble des pannes possibles, ce qui rend la procédure de génération d'hypothèse efficace. Cette conception se rapproche de celle de Rasmussen (1993a) pour qui la prise de décision et la planification deviennent un chaînage indice-action quand elles se produisent dans un contexte familier. La réduction de l'ensemble des pannes possibles peut être rapprochée du concept de focus proposé Nooteboom et Leemeijer (1993) pour qui le raisonnement de diagnostic est orienté vers un ensemble d'éléments susceptibles de contenir la panne.

Le développement d'habiletés de diagnostic est utile pour les pannes nouvelles. Bien que certaines relations causales soient spécifiques au contexte, une part des stratégies humaines peut être classée dans l'expertise indépendante du contexte. Dans le cas de pannes nouvelles, les patterns de symptômes susceptibles de déclencher un diagnostic symptomatique ne sont pas disponibles. La recherche symptomatique ne peut donc pas être utilisée. Une alternative est la recherche topographique (Rasmussen, 1986, 1993a). L'intérêt de ce type de diagnostic, même s'il ne suffit pas pour atteindre le diagnostic final (Yoon & Hammer, 1988), est qu'il repose sur un modèle normal du système et pas sur un modèle de dysfonctionnement. D'une manière générale, les situations de panne ou de supervision sont traitées préférentiellement au niveau des automatismes, puis à un niveau de contrôle de plus en plus élevé. Si les automatismes fournissent une possibilité d'action, celle-ci est exécutée. Si ce n'est pas le cas, on tente d'identifier l'état dans lequel se trouve le système. On essaie alors de trouver une règle indiquant que faire dans cet état. Si cette règle n'existe pas, on procède à une analyse de la situation en faisant des hypothèses sur des causes et on formule un diagnostic. Au terme de ce diagnostic, un but est généré et une procédure est appliquée (Richard, 1995).

On peut remarquer une constante dans les différentes conceptions de résolution de problème par les experts : la priorité accordée par les sujets aux règles d'association. Dans le cas du jeu d'échecs, le schéma ne peut être déclenché immédiatement puisque la configuration de départ est toujours la même. Au fur et à mesure que celle-ci évolue, le joueur recherche des configurations de pièces susceptibles d'être appariées à une configuration connue (Getz, 1996b). Les experts évitent de résoudre des problèmes sur le mode contrôlé. Dans le cas d'une recherche de panne ou d'une tâche de supervision, le niveau des règles est adopté le plus tôt possible et est abandonné le plus tard possible.

Dans le cas d'une situation inconnue, d'une tâche à forte charge cognitive ou encore dans le cas d'un raisonnement analytique, l'expert doit abandonner le niveau des règles et recourir à un

niveau de contrôle plus coûteux basé sur les connaissances (Amalberti, 1992). C'est un cas de figure dans lequel l'opérateur doit abandonner les stratégies habituelles et opter pour des chaînes d'inférences pour parvenir au but (Konradt, 1995). Ce passage à l'inférence pour conduire le diagnostic amène l'expert à utiliser un mode de raisonnement très qu'il utilise rarement. Raajmakers et Verduyn (1996) ont fait diagnostiquer des pannes à des opérateurs chargés de la conduite des systèmes de propulsion de navires militaires. Les tâches soumises aux sujets concernaient des pannes dans un système réel semblable à celui conduit habituellement mais jamais rencontré. Les résultats montrent que les connaissances générales qu'ont les sujets à propos des systèmes de propulsion déterminent en grande partie (72% de la variance expliquée et forte corrélation connaissances-performance) la performance au diagnostic.

1.4.8 L'heuristique de fréquence et le principe d'économie

Dans la grande majorité de leurs actions, les experts en dépannage fondent leurs opérations sur des probabilités. Ces probabilités reflètent la fréquence avec laquelle des co-occurrences symptômes-causes se manifestent. La fréquence sert d'indice de traitement de l'information. Lorsqu'un opérateur détecte des symptômes, il active un schéma contenant les procédures de test de certains éléments du système susceptibles d'expliquer ces symptômes. On peut penser que ces procédures sont passées en revue les unes après les autres, selon un ordre de pertinence, du plus probable au moins probable (Bereiter & Miller, 1989). Un opérateur expérimenté sait que certains éléments d'un système ont plus de chances d'être en panne que d'autres. Il connaît l'ordre dans lequel les hypothèses doivent être testées en premier. Les catégories de panne sont ordonnées mais aucune n'est exclue de façon permanente (Davis, 1984). La sensibilité à la fréquence augmente avec l'expérience. Cet effet serait soutenu par une base de connaissances plus représentative des cas déjà vus (Weber, Böckenholt, Hilton & Wallace, 1993). L'intérêt de l'heuristique de fréquence est également la libération des ressources cognitives qui vont pouvoir être allouées à une prise d'informations complémentaires ou à la préparation d'une procédure de remplacement. L'heuristique de fréquence permet, au travers d'un schéma, de récupérer un plan d'action que l'opérateur déroule. Ce plan est composé d'une série d'opérations routinières dont le résultat des unes déclenche le démarrage des autres. Dans le cas du dépannage, le plan commence par le test de la panne la plus fréquente et se termine par le test de la plus improbable. Le plan est élaboré sur la base des confrontations passées des opérateurs avec différents types de panne. Cette expérience automatise la sélection et le déroulement du plan. Dans la plupart des cas, la cause de la panne est trouvée avant la fin du plan de tests, ou, dans le

pire des cas, à la fin. L'expérience de l'opérateur fait que le plan couvre la majorité des causes possibles et la quasi totalité des pannes déjà rencontrées.

L'heuristique de fréquence peut être rapprochée de la théorie de la sous-spécification cognitive de Reason (1990). Celle-ci repose sur des indices de similarité et de fréquence. La sélection des connaissances par similarité constituerait le mode de sélection prédominant lorsque les indices de récupération sont "*adéquats pour spécifier une connaissance unique et que les connaissances sont abondantes*" (p. 175). La sélection par la fréquence serait utilisée dans des cas où "*les indices sont insuffisants ou ambigus et que le domaine de connaissances est pauvre (c'est à dire l'expertise limitée)*" (p. 175). Cette théorie peut être revue sous l'angle de la seule heuristique de fréquence. La position défendue ici propose que lors de l'activation d'un schéma, la fréquence est le mode de sélection le plus utilisé. Lorsque l'opérateur extrait des indices de la situation, c'est le schéma le plus fréquent qui est activé, relativement aux régularités observées dans le passé. On peut considérer que la similarité et la fréquence sont deux notions confondues. Une situation fréquente est nécessairement similaire à celles qui l'ont précédé et qui étaient de même nature. La similarité serait plutôt le mode de récupération mis en œuvre dans le cas d'une situation rare et suffisamment saillante pour que l'opérateur puisse rappeler des connaissances qui lui sont attachées.

L'économie des ressources est un aspect central du traitement de l'information. Le raisonnement en situation commence souvent par ce que l'opérateur sait faire ou par l'évocation des connaissances les plus disponibles. Le rappel est lui aussi soumis à ce principe et cela se vérifie même dans des situations tout à fait anodines de la vie quotidienne. Par exemple, Lutz, Means et Long (1994) ont montré que si on demande à des sujets tout-venant de rappeler l'endroit où leur voiture est garée, ils ont fortement tendance à rappeler l'endroit où ils se garent habituellement avec une marge d'erreur de trois à cinq places selon que ce rappel concerne l'emplacement de parking du jour même ou des jours précédents. Se garer souvent au même endroit a peut-être un double objectif d'économie : éviter de se demander où on va se garer et éviter de se demander où l'on s'est garé. On cherche probablement à rester dans des niveaux de traitement routiniers afin de laisser se dérouler sans contrôle des actes répétitifs (se garer et retrouver sa voiture).

Plus près de notre préoccupation théorique, le diagnostic est un domaine où l'économie des ressources et la précision passent par une réduction de l'ensemble des possibles (Duncan, 1985). L'efficacité du diagnostic peut se mesurer par la capacité d'un test à réduire l'ensemble des pannes compatibles avec les symptômes et par les tests effectués après que cet ensemble est réduit à l'unité (Duncan & Gray, 1975). Le raisonnement de professionnels expérimentés se

caractérise par une performance optimale pour un coût mental minimum. Ce comportement conduit à une prise de risque implicite permanente par l'opérateur dans la mesure où de nombreuses hypothèses ne sont pas testées. Cependant, cette prise de risques est contrainte puisque dans la plupart des cas, l'opérateur ne peut pas raisonner de façon systématique et exhaustive sur l'ensemble des données et des hypothèses (Amalberti, 1991b). D'une manière générale, l'opérateur ne recherche que l'information nécessaire à la résolution du problème habituel (Rasmussen, 1991). Les compétences n'étant pas toutes aussi économiques à mettre en œuvre, l'individu peut commencer à mettre en œuvre celles qui sont peu coûteuses et faire appel à d'autres, plus lourdes, seulement lorsque les précédentes ne peuvent pas conduire à la réussite (Leplat, 1991).

Ochanine (1978) a proposé un concept qui permet de cerner une partie du fonctionnement cognitif humain, particulièrement celui des experts. Il s'agit de l'image opérative. Celle-ci se présente comme un reflet de l'activité caractérisé par une représentation laconique de l'information. Cette représentation ne contient que ce qui est indispensable pour l'action et elle est déformée fonctionnellement (les caractéristiques centrales de l'objet sont amplifiées). Ochanine utilise le concept d'image opérative pour analyser le diagnostic de tumeurs de la thyroïde. Il a noté, en demandant aux médecins de dessiner les thyroïdes, que les tumeurs étaient représentées plus grosses qu'en réalité. Tout se passerait comme si les médecins laissaient transparaître dans leurs dessins la saillance de la tumeur vis-à-vis du reste des informations disponibles. Si cette déformation fonctionnelle est le reflet du contenu de la mémoire, alors les médecins encodent les informations pertinentes de manière saillante. Rabardel (1995) traite de l'opérativité des représentations des opérateurs dans des termes proches de ceux d'Ochanine. Pour cet auteur, les caractéristiques essentielles des représentations opératives sont en premier lieu leur rapport à l'action. Elles ont des fonctions d'orientation et de guidage. Pour des raisons d'économie sur le plan du fonctionnement cognitif, seuls certains aspects pertinents pour l'action sont représentés. La représentation ne vise donc pas la complétude et la sélection des éléments en fonction des besoins de l'action aboutit à une déformation de la représentation.

1.4.9 La variabilité

Les différences de niveau de compétence sont les sources de variabilité les plus importantes. Elles ne sont pas les seules. Au sein d'un même niveau de compétence et pour un même objectif, les connaissances mises en œuvre varient d'un opérateur à l'autre. Les causes de cette diversité sont discutées ici en termes de connaissances sur le domaine et d'expérience.

L'architecture cognitive de la compétence peut prendre des formes diverses. La correspondance entre la tâche et la compétence est multiforme, notamment parce que les exigences de la tâche peuvent être satisfaites avec des compétences différentes. Une même procédure peut être sous-tendue par des connaissances différentes de la même façon que les mêmes connaissances déclaratives ne garantissent pas qu'une même procédure soit utilisée. Une même procédure de dépannage peut être établie sur des vagues connaissances du système et se dérouler de façon routinière alors que dans d'autres cas, une procédure semblable sera issue d'une bonne connaissance des règles de fonctionnement (Leplat, 1991). Une même tâche peut être résolue par plusieurs stratégies différentes dont les exigences varient énormément (Rasmussen, 1991). La conséquence est que d'une fois à l'autre, un sujet n'utilise pas forcément la même stratégie (Rasmussen, 1993b). Un des facteurs de ce changement de stratégie est l'expérience et, à travers elle, la diversité des aides et indices informels que l'opérateur peut découvrir dans la situation et qu'il utilise pour son travail (Cuny, 1993).

Pour Amalberti (1991a) il n'y aurait pas une mais des expertises correspondant à un registre d'objectifs d'action reliés hiérarchiquement du plus ambitieux (tout faire de façon optimale) au moins risqué (assurer le minimum de résultats en préservant soi-même et le matériel). Toutes les constatations convergent vers une conception de l'expertise dépassant largement le cadre d'automatismes uniquement dérivés d'un système de connaissances spécifiques au domaine. Le concept d'une expertise générale peut être introduit pour rendre compte de ces divers résultats. Elle régulerait la mise en place et l'emploi des expertises sur le domaine tout en prenant le relais des connaissances expertes locales quand celles-ci seraient en conflit avec la compréhension et l'action sur une situation concrète. Cette position rejoint en partie celle d'Ohlsson (1993) pour qui il existe des schémas abstraits relatifs à une classe de problèmes qui serviraient à définir le type de schéma local à mettre en œuvre (Cf. § 1.4.5 La théorie des schémas). Johnson, Grazioli, Jamal et Zualkernan (1992) font ce constat en ce qui concerne la détection de fraudes fiscales. Le secteur d'appartenance d'un fiscaliste n'a pas d'effet sur sa performance et il est capable de détecter des fraudes dans des secteurs dont il n'est pas spécialiste.

La variabilité de la performance d'un opérateur peut s'expliquer en partie par la variabilité dans les caractéristiques de la tâche elle-même. Pour Schanteau (1992), les domaines dans lesquels le niveau de performance des experts est régulièrement élevé sont caractérisés par la constance de la tâche. Ceci permet à l'expert d'utiliser et de répondre aux feed-backs, contrairement à des tâches dans lesquelles la cible est mobile, inconstante d'une fois à l'autre. De ce point de vue, la performance experte n'est pas invariablement optimale. La compétence dépend des caractéristiques de la tâche. Un expert peut n'être efficace que dans certaines configurations particulières de la tâche. La variabilité est un trait important de la cognition humaine et a des

effets sur l'approche du travail à adopter. Toute tentative de moyenniser des données d'une population peut masquer la structure véritable des connaissances. Pour certains, une méthodologie de découverte appropriée à la complexité des connaissances humaines nécessite des données riches à propos d'individus plutôt que des données facilement analysables à propos d'une population (Kuipers & Kassirer, 1984).

1.4.10 Le raisonnement expert ? Un appariement

Dans la suite de notre exposé, les schémas, l'heuristique de fréquence et le principe d'économie vont jouer des rôles-clés. Les expériences qui seront présentées ultérieurement mettent en jeu ces trois concepts de façon assez directe. On a pu se rendre compte combien le concept d'inférence était éloigné de l'expertise. Ici, la résolution de problème ressemble plutôt à la récupération de la solution d'un problème déjà rencontré. En cela, le raisonnement tel qu'on l'a présenté dans le chapitre précédent est absent. La position qui est celle de cette thèse adhère à cette conception du raisonnement expert comme appariement de traits. C'est la position défendue pour l'expert mais ce pourrait être celle défendue pour le novice. Dans ces deux niveaux de compétence, la récupération est une source d'économie. C'est sans doute pour cette raison que la reconnaissance et la recherche heuristique sont des mécanismes de base dans le traitement de l'information (Simon, 1995). L'homme a tendance à chercher la solution optimale pour la dépense minimale. Cela n'implique évidemment pas que l'adoption d'un raisonnement par appariement garantit le résultat dans tous les cas de figure. Les recherches sur l'erreur sont là pour nous le démontrer et pour analyser les mécanismes d'erreur en fonction du niveau d'expertise de l'individu.

1.5 L'ERREUR

La puissance du raisonnement expert, dont il vient d'être question, ne doit pas faire oublier que l'humain peut se tromper. Les erreurs commises ne doivent pas être considérées ici comme un dysfonctionnement mais comme le reflet d'un mode de fonctionnement du système cognitif. On verra également que l'expérience dans un domaine de connaissance ne garantit pas l'absence d'erreurs mais en élimine seulement certaines formes.

1.5.1 Présentation

L'erreur a été considérée dès le début du siècle comme un indicateur des activités mentales. *"Tout comme les petites aspérités de la route permettent à celui qui y est accoutumé de trouver son chemin dans le noir, les petites inadvertances de l'expression, les petits écarts de langage, les lapsus de la pensée, les confusions des idées, les anicroches ou les ratés du parler et de l'écrit sont quelquefois, pour celui qui étudie la nature humaine, les guides les plus utiles et les plus infaillibles vers la compréhension des processus mentaux. Les vécilles que l'on néglige sont quelquefois révélatrices des problèmes de recherche les plus fructueux"* (Bawden, 1900, p. 5, cité par Reason, 1990, p. 37). Plus récemment, Johnson et Rouse (1982a) posent que les fautes des opérateurs ont plus d'intérêt que les comportement normaux dans la mesure où elles fournissent un éclairage sur les limites de l'être humain.

La majorité des recherches sur l'expertise présentent l'expert comme un sujet qui peut conduire des tâches complexes avec une grande fiabilité, qui dispose de capacités de traitement élevées et qui commet moins d'erreurs qu'un novice. La présentation qui sera faite ici de l'expertise tend à montrer que l'expert est un sujet qui commet des erreurs d'un certain type et que la notion d'expertise n'est pas synonyme d'infailibilité. Notre premier exemple d'erreur d'expert est rapporté par Hecht et Profitt (1995). Ces auteurs ont demandé à des sujets plus ou moins experts dans le maniement des liquides de tracer le niveau de l'eau dans un verre incliné représenté, dans un dessin, au-dessus d'un récipient (Cf. Figure 5). L'erreur est mesurée par l'angle qui sépare l'horizontale du niveau tracé par le sujet. Les résultats montrent que les sujets qui s'écartent le plus de l'horizontale sont ceux qui ont le plus d'expérience dans le domaine (des serveuses et des serveurs). Les sujets non experts du domaine (femmes au foyer, étudiants, chauffeurs de bus) montrent les performances les plus élevées. Cette expérience mesure une habileté perceptive en relation avec le maniement d'un liquide. Bien que l'existence d'erreurs

d'expert concerne probablement tous les domaines d'activité, l'exposé qui suit traite d'erreurs d'un niveau plus symbolique qui sont celles rencontrées dans les tâches de résolution de problème.

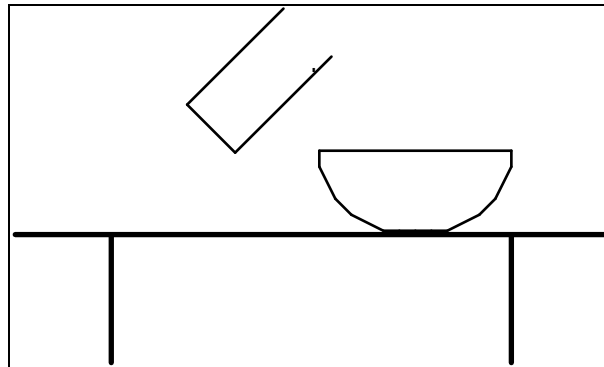


Figure 5 : Représentation graphique de la tâche de Hecht et Proffitt (1995)

1.5.2 Typologie de l'erreur

Toutes les actions humaines sont gouvernées par l'interaction complexe de deux modes de contrôle. Le mode attentionnel a des capacités de traitement puissantes. Il est dirigé par feedback et est essentiel pour traiter les situations nouvelles. Il est lent, coûteux, limité, séquentiel et difficile à maintenir. Le mode schématique n'a pas de limites de capacités connues et peut traiter des informations familières rapidement, en parallèle, de façon automatisée, sans implication consciente ou effort. Il est relativement inefficace face à des situations inconnues. On va voir que ces deux modes déterminent le type d'erreur qu'un opérateur peut commettre.

Reason (1990) attribue à l'erreur un statut d'objet de connaissance ainsi que d'indice privilégié de la compréhension du comportement humain. Il considère que *"la performance correcte et l'erreur systématique sont les deux faces d'une même pièce"* (p. 22). L'approche de l'erreur que proposent Reason et Zapf, Maier, Rappensberger et Irmer (1994) repose en grande partie sur le modèle de Rasmussen. Au niveau des automatismes, l'activité humaine est contrôlée par des configurations mémorisées d'instructions pré-programmées. Les erreurs de ce niveau sont soit le déclenchement d'un comportement cohérent au mauvais moment (et/ou endroit) ou des omissions. Le niveau des règles s'applique à la résolution de problèmes familiers, dont les procédures sont contrôlées par les règles. Les erreurs, à ce niveau, sont liées à de mauvaises classifications de situations qui conduisent à l'application de règles erronées ou au rappel incorrect de procédures. Le niveau des connaissances déclaratives entre en jeu dans les situations nouvelles, pour lesquelles les actions doivent être planifiées en temps réel et contrôlées consciemment. A mesure que s'accroît

l'expertise, le contrôle se déplace vers l'automatisme. La conséquence, sur le terrain, est que la connaissance d'un certain type de panne dans un système va activer les indices de résolution dès le début de l'incident. C'est le cas de l'incident dit défini. A l'inverse, l'incident indéfini va mettre en jeu des processus de résolution autres que les automatismes du fait du caractère inconnu de la cause de l'incident (Decortis, 1993).

Sallminen et Tallberg (1996) s'appuient également sur le modèle de Rasmussen (1986) pour définir des types d'accidents qui reposent sur trois niveaux de contrôle de l'activité. Les erreurs du niveau des automatismes sont sensori-motrices mais ne concernent pas la résolution de problème (L'opérateur n'a pas vu le danger et a glissé). Les erreurs du niveau des règles surviennent dans l'exécution de tâches routinières dans une situation connue qui ne requiert pas de connaissances générales. Les erreurs du niveau des connaissances se produisent dans une situation nouvelle où des moyens doivent être sélectionnés sous contrôle attentionnel pour traiter la situation (L'opérateur ne connaît pas les propriétés des matériaux utilisés dans un mélange et ne prend pas de précautions). Pour Hoc (1996), au niveau des automatismes, les ratés sont liés à l'intrusion d'une action dans une situation où elle n'est pas appropriée. Au niveau des règles, les erreurs reposent sur l'application de mauvaises procédures, à cause d'un mauvais encodage de la situation ou sur l'application d'une règle fréquente à une situation rare. Ici, on retrouve ce qu'Anderson (1993) appelle la force d'encodage et qui détermine la probabilité d'utilisation des règles en fonction de leurs utilisations passées.

Reason (1987b) propose une classification des types de fautes et de leurs causes. Dans sa terminologie, les fautes dites de rationalité limitée renvoient au fait que seuls certains aspects du problème sont présents dans la base de travail. Ces limitations sont inhérentes au mode de contrôle attentionnel et sont caractérisées par une sur-simplification. Les fautes de rationalité imparfaite (a) sont dues au mode schématique. Les schémas peuvent être déclenchés par des facteurs tels que la fréquence d'usage. Les fautes de rationalité hésitante (b) proviennent de l'interaction entre les modes attentionnels et schématiques. Le besoin d'éviter l'effort cognitif peut accorder trop d'importance à ce qui peut ressembler à des indices familiers et à l'application de solutions prêtes à l'emploi à des problèmes connus. Les fautes irrationnelles (c) ne tiennent pas compte du fait que le décours de l'action mène à un désastre.

Chang, Di Cesare et Goldbogen (1991) proposent de dichotomiser les erreurs en une classification fonctionnelle, associée aux caractéristiques de l'opération et une classification structurale, qui comprend les erreurs de position et d'orientation, les erreurs d'outils, de machine et de tolérance. Un sujet qui n'aurait que des connaissances structurales ne pourrait faire qu'un diagnostic à échelle réduite (la machine ou ses composantes) contrairement à un sujet qui n'aurait que des connaissances fonctionnelles qui ne pourrait diagnostiquer que des erreurs à grande

échelle (le système dans son ensemble). Chang *et al.* (1991) décrivent et classent les types de dysfonctionnements susceptibles d'être rencontrés dans un système. Un échec survient lorsque l'opérateur perçoit que le système cesse de délivrer la sortie attendue. Une erreur survient lorsqu'une partie du système atteint un état indésirable. Une faute est une cause d'erreur, d'une séquence d'erreurs ou d'un échec. Cette description formelle permet d'identifier le type de stratégie que le sujet doit mettre en oeuvre pour effectuer son diagnostic. Le diagnostic d'une erreur suppose l'identification d'un échec. Cette identification n'est pas triviale puisqu'elle nécessite la connaissance des états normaux du système. En revanche, le diagnostic d'une faute suppose l'identification d'un échec et d'une erreur. Ce dernier type de diagnostic impose de remonter plus haut dans l'arbre causal.

Doireau, Wioland et Amalberti (1995) font détecter des erreurs à des pilotes lors de la projection d'un film de pilotage. Ils constatent que les erreurs les mieux détectées sont celles qui mettent en jeu la sécurité ou qui correspondent à des actions non planifiées. Sur le plan du déroulement temporel de l'erreur, les auteurs isolent une détection anticipée dans 2 % des cas, une détection contemporaine (lors de la production de l'erreur) dans 85 % des cas et une détection rétroactive (à partir des conséquences de l'erreur) dans 13 % des cas. Dans l'ensemble, les sujets n'ont pas besoin des conséquences de l'erreur pour la détecter. Le fait que l'erreur puisse être détectée lors de sa production dénote la perception d'une déviation de la procédure. Ce cas de figure est à rapprocher des activités de contrôle dans le diagnostic. Le contrôle a un rôle préventif et fonctionne principalement par anticipation et comparaison entre l'état courant de la situation et l'état attendu. Une différence entre ces deux états est perçue comme la conséquence d'une erreur.

Ohlsson (1996) propose une dichotomie objectif/subjectif dans le cadre de l'erreur. Pour cet auteur, l'erreur objective est une action qui n'est pas sur le chemin le plus court vers le but. C'est le cas du novice qui se trouve dans une situation comportant plusieurs options dont seules certaines mènent au but. L'erreur subjective part du principe que les actions ne sont ni correctes ni incorrectes en soi et que leur nature est déterminée par la situation. Une même action peut alors être correcte dans une situation et incorrecte dans une autre. Ce problème de classification peut avoir pour origine les relations de cause à effet entre les événements déclencheurs d'une erreur et l'erreur elle-même. Des erreurs différentes peuvent avoir des causes reliées et des erreurs identiques peuvent avoir des causes différentes (Booth, 1991).

Parmi les erreurs (ou sources d'erreur) que peut commettre (ou tolérer) un opérateur en situation de diagnostic, on peut relever le manque de sous-buts, l'échec dans l'utilisation de tous les symptômes et la recherche dirigée par hypothèse. Le manque de sous-buts est une erreur qui concerne la méthode utilisée par l'opérateur et la planification de la tâche qu'il développe. La non utilisation de tous les symptômes pourrait être une des restrictions à la prise d'information

imposée par l'heuristique de fréquence. La recherche dirigée par hypothèse est soumise au biais de confirmation et procède à des tests partiels (Patrick, James & Friend, 1996). On peut remarquer qu'aucun niveau de traitement (automatisé par une heuristique ou inférentiel par une hypothèse) ne garantit la sécurité du raisonnement. Pour Johnson et Rouse (1982a), les erreurs de diagnostic peuvent se décrire à plusieurs niveaux, depuis l'observation de l'état du système, en passant par le choix des hypothèses et des procédures jusqu'à l'exécution de ces procédures. En s'appuyant sur la typologie de l'erreur de Reason (1990) et sur le modèle de Rasmussen (1986), on peut relever différentes classes d'erreurs de diagnostic. Au niveau des connaissances (a), le diagnostic repose sur des traitements contrôlés mis en oeuvre dans une tâche non familière. Le raisonnement est inférentiel et les erreurs peuvent être causées par l'étendue du champ des possibles à prendre en compte. La connaissance des fréquences d'occurrence des pannes est absente et le diagnostic peut démarrer sur un indice inapproprié. Au niveau des règles (b), les erreurs de diagnostic sont liées à la mise en oeuvre de procédures incorrectes. Pour un mécanicien par exemple, ce type d'erreur concerne les tests qu'il peut mettre en oeuvre pour établir le diagnostic. Une séquence correcte d'opérations est déclenchée, mais dans un cas de figure éloigné des conditions optimales de mise en oeuvre. Un indice saillant ou la négligence d'un symptôme peuvent être les causes du déclenchement d'un schéma inadéquat. Ici, le biais de fréquence joue un rôle prépondérant et domine sur l'exactitude des symptômes. Les schémas sont déclenchés sur la base des activateurs les plus fréquents ou les plus saillants. Au niveau des automatismes (c), l'erreur concerne principalement des séquences sensori-motrices, des inversions non intentionnelles, des oublis, etc.

Le traitement rapide de l'information, caractéristique de la cognition humaine, est possible grâce aux régularités du monde. Les routines qui s'y rapportent sont représentées de manière interne sous la forme de schémas. Ces outils de traitement d'information largement automatisés ont tendance à faire commettre des erreurs dans la direction du familier ou de l'attendu. Ces erreurs sont susceptibles de se produire lorsque des changements surviennent, quand les routines ne sont plus appropriées et que les objectifs changent (Reason, 1987a).

1.5.3 Des biais dans le diagnostic

Le niveau des connaissances produit des erreurs qui reposent en grande partie sur des biais. Les exemples qu'en donne Hoc (1996) sont le biais de confirmation et les heuristiques de représentativité et de disponibilité (Kahneman & Tversky, 1972, cités par l'auteur). On va essayer

de montrer que le niveau des règles peut aussi être impliqué, notamment dans le cas d'une erreur d'expert.

1.5.3.1 Le biais de confirmation

Un des biais rencontrés dans les situations de résolution de problème est le biais de confirmation. C'est le cas typique d'un sujet qui teste son hypothèse par des cas qui la confirment (H+) plutôt que par des cas qui l'infirmen (H-). Pour Klayman et Ha (1989), les sujets qui utilisent les tests H+ sont plus nombreux que les sujets qui utilisent les tests H-. La limite d'une telle stratégie de test est qu'elle fournit une information limitée à propos des erreurs potentielles. Les tests H+ ne révèlent que les faux positifs (des cas que l'hypothèse identifie à tort comme des cibles) et non pas les faux négatifs (les cas cibles que l'hypothèse échoue à identifier). Autrement dit, les tests H+ permettent de savoir si un cas est inclus dans l'hypothèse, mais on ne peut pas savoir si l'hypothèse inclut tous les cas. Lorsqu'il est confronté à un pattern de symptômes dans un environnement complexe, le sujet a trop d'hypothèses concurrentes pour procéder rationnellement afin de trouver une panne. Divers procédés cognitifs peuvent être mis en oeuvre qui réduisent la charge mais conduisent à une performance médiocre. Les hypothèses sont générées prématurément sur la base de preuves insuffisantes, des preuves de confirmation plutôt que d'infirmer sont recherchées et une vision en tunnel est développée (Munley & Patrick, 1997). Les sujets ont des difficultés à utiliser des tests qui indiquent qu'un composant n'est pas en panne. Les sujets ont tendance à rechercher des composants en panne et le fait qu'un composant ne soit pas en panne ne paraît pas toujours pertinent (Rouse, 1979b).

Le traitement automatisé de l'information et les biais de confirmation qui s'installent dans le processus de diagnostic rendent l'issue du raisonnement incertaine. Bereiter et Miller (1989) font remarquer que les difficultés rencontrées au début d'un diagnostic résident dans le non abandon d'un chemin de recherche incorrect, en dépit de tests répétés qui indiquent que ce n'est pas la bonne voie. La persévérance dont font preuve certains opérateurs révèle leur incapacité à infirmer l'hypothèse émise ou à ne pas détecter des informations contradictoires à cette hypothèse. L'automatisation du raisonnement ajoute une seconde difficulté. L'heuristique de fréquence, construite avec l'expérience, économise les ressources par abandon de l'inférence, réduit le champ des possibles pris en compte par l'opérateur et limite les possibilités qu'il aurait d'infirmer une hypothèse.

1.5.3.2 Le biais de fréquence

La fréquence (Cf. § 1.4.8 L'heuristique de fréquence) est considérée ici comme un générateur d'erreur. Selon Pazzani (1987), un opérateur peut commettre une erreur dans son diagnostic en formulant une hypothèse incompatible avec les symptômes. L'opérateur peut également formuler un mauvais diagnostic en considérant les symptômes comme révélant un état inhabituel mais normal, sans que les conditions d'apparition de cet état soient réunies. Enfin, l'opérateur peut supposer le système en panne alors que celui-ci vient seulement de recevoir une entrée inhabituelle. Les deux derniers cas (output inhabituel et input inhabituel) mettent l'accent sur la fréquence d'apparition des symptômes. Cette fréquence joue un rôle majeur dans la représentation de la panne en retenant les symptômes les plus statistiquement probables et en délaissant les plus improbables. A ce titre, l'opérateur est un statisticien faillible (Patrick, 1993). Des erreurs peuvent survenir lorsque l'opérateur considère un répertoire d'actions trop limité. Dans ce cas, l'analyse de la situation est trop étroite et peut conduire à des erreurs (Hoc, 1996). C'est le cas d'un opérateur qui déclenche une procédure sur la base d'indices situationnels familiers en négligeant les autres informations présentes dans la situation. Ces erreurs ne sont pas un manque de connaissances mais une erreur spécifique dans un processus qui mène au succès la plupart du temps (Johnson *et al.*, 1992). Le risque est de déclencher une procédure sur des indices partiels. Le mode schématique, automatisé, qui dirige une grande partie de nos activités doit inclure un ensemble varié d'exemples afin d'éviter les corrélations de surface entre indices et solutions (Hunt, 1992). Cela n'empêche pas les opérateurs de travailler à partir de postulats susceptibles de masquer des causes de dysfonctionnement. Un des postulats les plus universels et d'accorder sa confiance aux instruments de mesure. Lorsqu'un instrument tombe en panne en même temps qu'un composant du système qu'il mesure, les opérateurs ont tendance à ne pas remettre en cause l'état de l'instrument de mesure. La fréquence est à l'origine de ce comportement (Patrick, Gregov, Halliday, Handley & O'Reilly, 1999).

1.5.4 Conclusion du chapitre

On ne peut dissocier l'erreur des connaissances du sujet et ses modes de contrôle de l'activité. Le niveau de compétence et les connaissances disponibles sont autant de facteurs qui modulent les occurrences et la nature des erreurs. On gardera présente à l'esprit l'idée que l'opérateur expert commet des erreurs qui reposent principalement sur un effet de fréquence.

Nous venons de terminer, avec ce court chapitre sur l'erreur, la présentation des trois axes théoriques qui vont supporter le reste de la thèse. Le raisonnement a été abordé comme un outil de résolution de problème. Dans notre conception, les mécanismes qui le sous-tendent sont

principalement mnésiques et non pas analytiques. Les données exposées à propos de l'expertise viennent à l'appui de cette vision des choses. Les théories de l'erreur nous permettront de mieux traiter les productions des sujets expérimentaux.

Le chapitre suivant traite du diagnostic. On se servira de concepts qui ont été présentés et qui vont maintenant se trouver dans un contexte légèrement différent. Légèrement différent... car après tout, le diagnostic n'est qu'une forme de raisonnement.

1.6 L'ACTIVITE DE DIAGNOSTIC

Nous voici parvenus au cœur du sujet. Tout ce qui vient d'être dit dans les chapitres précédents va nous servir à comprendre ce qu'est le diagnostic. On va voir ici ce qu'on peut désigner par ce vocable et les situations dans lesquelles il est impliqué¹¹. Le diagnostic, en tant qu'objet d'étude, est abordé dans des situations de laboratoire ou de terrain. Il commence souvent par une extraction de symptômes qui supportent le raisonnement. Celui-ci peut être vu comme une activité de classification ou de correction d'une déviation. Il peut également être une composante d'une activité plus large comme le contrôle de processus ou la prise de décision. Enfin, le diagnostic peut être réalisé par une machine et on abordera deux approches de type automatique.

En guise d'introduction et pour cadrer le discours qui suit, le diagnostic est vu ici comme une activité de compréhension qui est finalisée par une décision d'action. *"Le sens que donne la représentation à la situation ne vaut qu'en ce qu'il éclaire la décision d'action"* (Hoc, 1993). Le diagnostic permet de comprendre pour agir. C'est un outil de décision.

1.6.1 Diagnostic sur réseau formel

Les études sur le diagnostic peuvent se répartir rapidement en deux classes : celles qui étudient le diagnostic en situation naturelle et celles qui étudient le diagnostic au travers d'une tâche formelle de type réseau causal, implémenté ou non sur un ordinateur. Bien que ce point puisse être en soi l'objet d'un débat, on entendra par situation naturelle tout dispositif dans lequel sont présents les outils habituels de l'opérateur et où la tâche est identique dans sa présentation et dans sa structure à celle que l'opérateur a l'habitude de traiter. Ce dernier point a son importance pour l'étude expérimentale car une tâche trop simple déclenche des diagnostics non représentatifs (Hoc & Amalberti, 1995 ; Rasmussen, 1993b).

Les études du diagnostic en situation naturelle sont nombreuses et les dispositifs très divers. Cette diversité comprend, entre autres, le dépannage d'un système d'allumage automobile (Weill-Fassina & Filleur, 1989), le contrôle d'un haut fourneau (Hoc, 1991), le pilotage d'avions

¹¹ Certains auteurs seront cités en référence à plusieurs approches différentes. Cela est dû au fait que ces auteurs eux-mêmes présentent le diagnostic selon plusieurs points de vue.

(Amalberti, manuscrit) ou la conduite d'une usine géothermique (Venda, Stishkovskaya, Dromey & Laliberté, 1994). L'approche, dans ce type d'études, est globale. Ce sont les stratégies mises en oeuvre, les plans d'action, l'interaction avec l'environnement qui intéressent les auteurs. Les connaissances produites par ce type de recherche sont d'un format "naturel" et transférables dans une autre situation. Deux retenues s'y opposent parfois : l'effectif des sujets et la nature de la situation étudiée, qui peut ne permettre d'application que dans un domaine d'activité identique à celui étudié. Cependant, le but de telles recherches reste bien d'abstraire la connaissance, afin de la rendre généralisable. Mais comme l'affirment Karnas et Van de Leemput (1990), poser la question de la généralisation revient à poser la question de la classe de situations dont la situation expérimentale peut être considérée comme représentative. L'étude du diagnostic au travers de situations de laboratoire telles que celles qui vont être présentées ici pose le problème de la généralisation des résultats. D'une part, cette généralisation est difficile compte tenu de la spécificité de la situation expérimentale et du caractère inconnu du dispositif pour les sujets expérimentaux. D'autre part, les raisonnements étudiés dans les expériences de ce type sont locaux et non représentatifs de l'ensemble des processus à l'oeuvre dans le raisonnement.

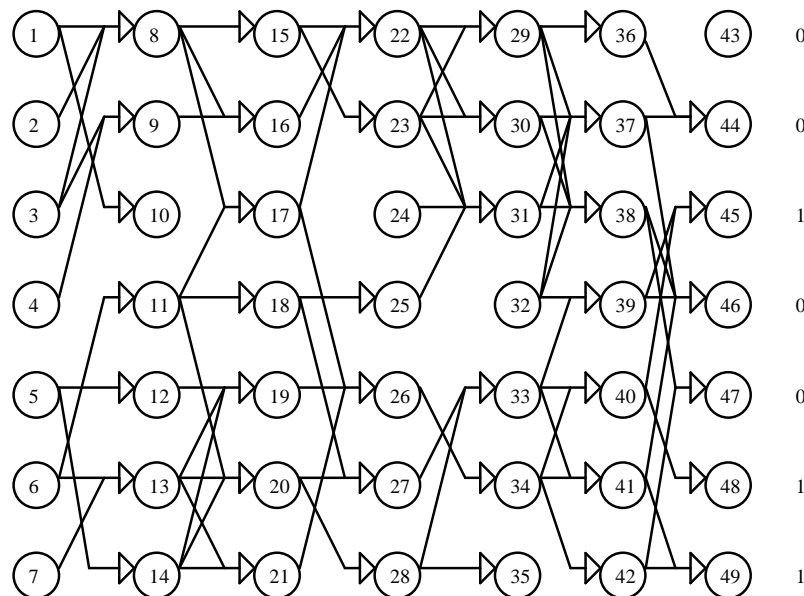


Figure 6 : Le réseau de Rouse (1978)

Les études en situation formelle concernent pour une large part le diagnostic en réseau causal. Citons les exemples de Rouse (1978, 1979b) (Cf. Figure 6), de Sanderson et Murtagh (1990) (Cf. Figure 7) de Goldbeck, Bernstein, Hillix et Marx (1957) (Cf. Figure 8) et de Dale (1957) (Cf. Figure 9). Dans le réseau de Rouse, un nombre aléatoire d'arcs entrent dans chaque noeud. De même, un nombre aléatoire d'arcs partent de chaque noeud. Les noeuds produisent

soit 0, soit 1. Les arcs transportent la valeur du noeud. Un noeud produit 1 si tous les arcs qui entrent dans ce noeud transportent la valeur 1 et si le noeud n'est pas en panne. Si ces deux conditions ne sont pas remplies, le noeud produit 0 sur tous les arcs qui partent de lui. Le processus de transmission de la panne fait que celle-ci se propage dans tout le réseau. Le sujet doit identifier le ou les composants défectueux. Dans le dispositif de Sanderson (1990) (Cf. Figure 7), les sujets doivent trouver un composant défectueux dans un réseau dont les arcs sont invisibles. Le sujet doit inférer le nombre et la nature des liens qui existent entre les noeuds.

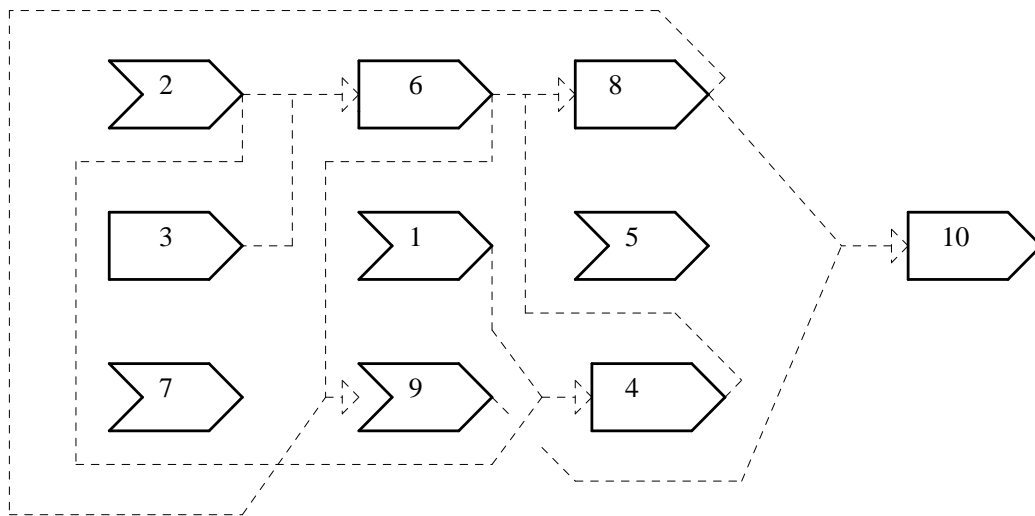


Figure 7 : Le réseau de Sanderson (1990) (adaptation)

Goldbeck *et al.* (1957) (Cf. Figure 8) et Dale (1957) (Cf. Figure 9) étudient la mise en œuvre du split-half (Cf. § 1.6.8.1 Stratégie topographique et stratégie symptomatique) dans le cadre du diagnostic de panne. Le réseau de Goldbeck *et al.* (1957) est composé de 10 chaînes de 10 composants assemblés en série. Chaque chaîne est connectée à une autre chaîne par un point aléatoire. Donc, chaque chaîne a un point de connexion distant qui est soit un input soit un output.

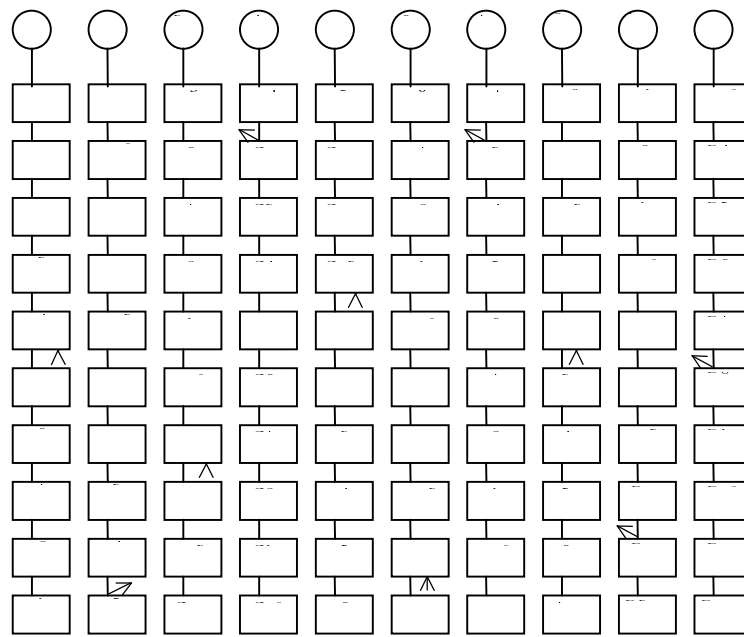


Figure 8 : Le réseau de Goldbeck et al. (1957).

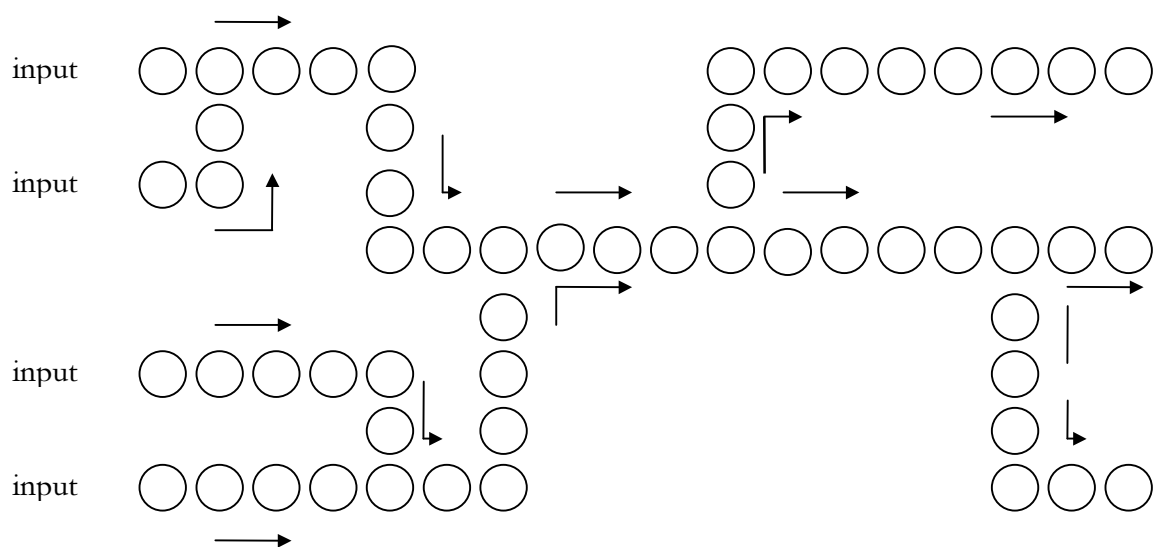


Figure 9 : Le réseau de Dale (1957)

Les différentes études de diagnostic formel qui ont été présentées impliquent la mise en œuvre de chaînages dans le raisonnement. Un chaînage est une suite d'inférences causales dans laquelle l'objectif est d'atteindre un but ou un sous-but. Cette forme de raisonnement est essentielle pour le diagnostic dans la mesure où la découverte d'une cause de dysfonctionnement implique souvent une recherche dans un arbre causal. Il existe trois types de chaînage.

Le chaînage avant ou raisonnement prospectif (Cf. Figure 10) démarre à partir d'un état initial, une suite d'inférences. Le but de ce chaînage est de descendre dans l'arbre causal.

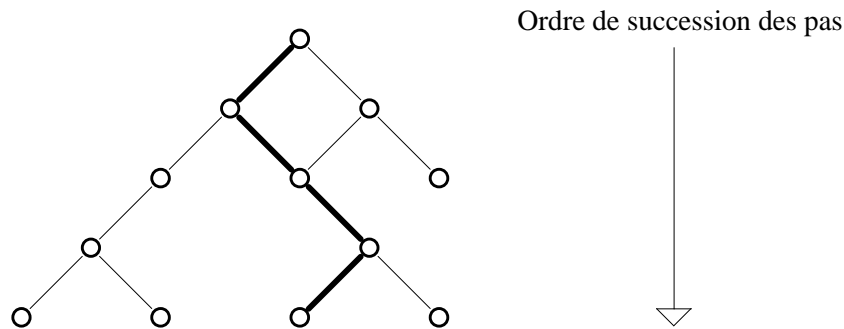


Figure 10 : Succession des pas dans le chaînage avant

Ce type de chaînage est adapté, par exemple, à l'anticipation. L'évaluation des conséquences d'une panne non familière dans un système se fait par pas successifs de nœud en nœud jusqu'à la découverte d'un élément du système susceptible d'être perturbé par la panne. Ce type de chaînage est un outil de prédiction qui anticipe les conséquences d'une opération sur le comportement futur ou en aval du système.

Le chaînage arrière ou raisonnement rétrospectif (Cf. Figure 11) démarre, à partir de l'état final (une panne ou un état quelconque du système) une suite d'inférences dont le but est de découvrir la ou les causes de l'état final.

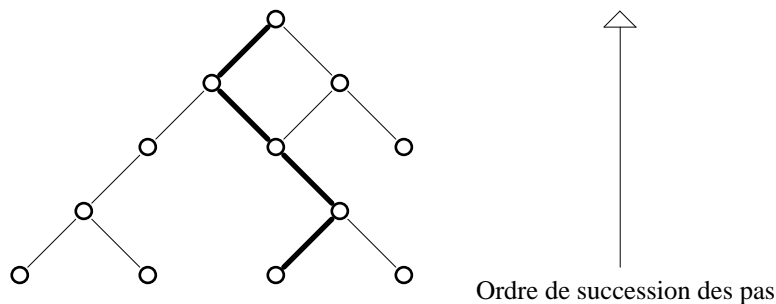


Figure 11 : Ordre de succession des pas dans le chaînage arrière

C'est surtout ce dernier type de chaînage qui se rapproche du diagnostic sur réseau causal. Une fois la panne identifiée, la recherche de ses déterminants commence par le nœud du réseau jugé pertinent, situé immédiatement avant celle-ci. Il se peut que des phases de chaînage avant et arrière coexistent, notamment dans les activités de vérification où, après avoir trouvé la cause d'un dysfonctionnement par chaînage arrière, l'opérateur "refait le chemin dans l'autre sens" pour s'assurer que les liens de causalité qu'il a établis engendrent effectivement les effets attendus.

Le chaînage opportuniste s'applique dans les situations où il existe plusieurs solutions au problème et dont les critères d'évaluation des solutions sont multiples et souvent contradictoires. Dans ces activités, les pas de résolution ne sont pas mis en oeuvre selon une stratégie pré-définie (Bisseret, Figeac-Letang & Falzon, 1988) mais ajustés par feed-back. C'est l'évolution de la représentation que l'opérateur construit qui guide le raisonnement et les résultats intermédiaires vont à leur tour modifier la représentation. Sur le plan cognitif, la charge inhérente à ce type de situation est importante. En résumé, l'opérateur doit maintenir un but à long terme (résoudre un problème), des buts à court terme (trouver des résultats intermédiaires) et mettre à jour une représentation du problème.

Ces trois types de chaînages peuvent être supportés par une stratégie topographique (Cf. 1.6.8.1 Stratégie topographique et stratégie symptomatique). Dans ce cas, l'opérateur emprunte un "chemin" dans le système, en suivant un conduit, un câble, un flux ou tout autre élément matériel. Les chaînages peuvent également être supportés par une stratégie symptomatique. L'opérateur suit alors des liens non matériels du système tels que des relations fonctionnelles. Dans ce cas, la représentation joue un rôle central car le raisonnement de diagnostic n'a pas de support physique. Quel que soit le type de chaînage (avant, arrière ou opportuniste), l'inférence est déductive. Pour un diagnostic topographique, l'opérateur peut appliquer une règle de type :

[si la panne n'est pas localisée sur l'élément X testé, alors X n'est pas la cause de la panne → tester un autre élément topographiquement relié à X].

Pour un diagnostic symptomatique, l'opérateur peut appliquer une règle du type :

[si la panne n'est pas localisée sur l'élément X testé, alors X n'est pas la cause de la panne → tester un autre élément fonctionnellement relié à X].

La règle présentée ici ne résume pas à elle seule la complexité du diagnostic. Elle nous sert d'exemple et de base de réflexion pour ce qui va suivre. Pour Hoc et Amalberti (1994 ; 1995), le chaînage arrière est inductif et le chaînage avant est déductif : "*L'inférence est inductive quand l'information nouvelle se situe en amont de la chaîne causale (on trouve la cause d'un phénomène) alors que l'inférence est déductive lorsque l'information nouvelle se situe en aval de la chaîne (on anticipe un phénomène)*" (Hoc & Amalberti, 1994, p. 187). D'après la définition que nous avons donnée plus haut de l'induction (Caverni *et al.*, 1990 ; Cf. 1.3.2 Déduction, induction, abduction), on ne peut affirmer que le chaînage arrière (remonter dans l'arbre causal) soit inductif. L'induction vise à produire la connaissance non vérifiable d'un concept à partir de certains de ses exemples ou découvrir une loi par la détection de liens entre des cas d'application de cette loi ou encore créer une règle par la détection de constantes (Richard, 1990). La déduction, elle, vise à produire une connaissance sûre. Dans un chaînage, l'inférence à l'oeuvre est uniquement déductive. Celle-ci est orientée vers

l'amont de l'arbre causal dans le cas d'un chaînage arrière et vers l'aval dans le cas d'un chaînage avant.

Le raisonnement causal ne se limite pas à du chaînage. Pour Yoon et Hammer (1988), il existe deux directions dans le raisonnement causal à propos d'un système. La première est orientée des observations vers les hypothèses. La tâche est déclenchée par les observations du comportement du système et sera ramenée à une tâche de recherche dirigée par les données. C'est le cas lorsque les données sont collectées sans hypothèse particulière ou quand les observations montrent des patterns inattendus. Ce processus sert à la fois à développer l'ensemble des hypothèses et à le réduire. La seconde direction du raisonnement chemine depuis les hypothèses vers les actions. Quand les hypothèses doivent être évaluées, l'opérateur construit un plan de test qui confirme une hypothèse et rejette l'autre. Les auteurs qualifient ce processus de "recherche dirigée par les hypothèses". Pour Govindaraj et Su (1988), le diagnostic implique du raisonnement vers l'avant et vers l'arrière, c'est à dire respectivement, des symptômes vers les causes et des causes vers les symptômes. On sait que les opérateurs experts recherchent des paires symptômes-causes. Cependant, les opérateurs raisonnent aussi vers l'avant, depuis les causes probables pour formuler et éliminer des hypothèses. Le raisonnement vers l'avant permet aux opérateurs de raisonner à travers la dynamique du système et dans le temps, en commençant par un composant estimé pertinent pour le test visé.

La position défendue ici pose que le raisonnement est fondé sur des structures de connaissance permettant des traitements automatisés, rapides et fiables. Il est donc peu probable que des sujets experts d'un domaine de connaissance utilisent un chaînage pour identifier la cause d'un dysfonctionnement. C'est en tout cas ce que l'on peut avancer à propos d'un dysfonctionnement familier pour lequel les indices situationnels déclenchent des procédures de correction. Dans le cas d'une panne inconnue et une fois les procédures routinières épuisées, l'opérateur peut avoir recours à des traitements contrôlés, parmi lesquels on trouve des chaînages.

1.6.2 L'identification des symptômes

Bien que pour certains ce ne soit pas un déterminant de l'expertise en dépannage (par exemple : Vessey, 1985), la détection des symptômes pertinents explique une partie de la différence expert-novice en dépannage. Il ne s'agit pas d'un processus perceptif. C'est un processus interprétatif qui sous-tend le diagnostic. Relever des caractéristiques de fonctionnement d'un système est une prise d'information passive à laquelle il faut ajouter la

connaissance des états normaux et anormaux de ce système pour que le processus d'interprétation permette d'identifier des symptômes. La reconnaissance des caractéristiques situationnelles comme des symptômes est la marque de l'existence, chez le sujet, de connaissances déclaratives à propos de son environnement de travail (Ohlsson, 1996). Allwood et Björhag (1991) ont montré que des novices en informatique peuvent augmenter leur performance de débogage si on les incite à rechercher les bonnes informations. Ces sujets reçoivent un entraînement d'une heure durant laquelle ils apprennent à suivre les flux d'information dans le programme, à comprendre les messages d'erreur, à éditer le programme pour localiser le bug et à comprendre les conséquences de leurs actions avant de les implémenter. Cet entraînement permet d'obtenir une meilleure performance qu'un groupe contrôle non entraîné. Ce résultat n'est pas trivial. Il suppose que des composantes d'entraînement pertinentes ont été retenues par les auteurs et que ces composantes touchent en partie la recherche, la sélection et l'interprétation de l'information.

La détection des symptômes revêt une grande importance dans le processus de diagnostic. C'est la première indication d'un dysfonctionnement et la première étape du diagnostic (Duncan, 1985). La forme des symptômes influe sur le raisonnement. Selon le domaine, ils peuvent être plus ou moins difficiles à détecter. Dans les domaines industriels, il est souvent évident qu'il y a un problème. Par contre, dans les domaines médicaux, cela peut être beaucoup moins clair du fait du caractère parfois vague de la présentation des symptômes (Schaafstal, 1993) ou de la prévalence d'une configuration perceptive de traits (Brooks, Norman & Allen, 1991). Chez les radiologues, la perception est guidée par des représentations mentales (Mumma, 1993) et la configuration des symptômes joue un rôle primordial. Medin, Altom, Edelson et Freko (1982) ont fait apprendre à des sujets naïfs les symptômes d'une maladie. Lorsque certains symptômes X et Y sont corrélés dans les cas d'apprentissage, les sujets ont tendance à rechercher cette corrélation dans les cas-tests. Ils jugent les cas dont les symptômes X et Y sont corrélés plus typiques de la maladie que les cas dont ces symptômes ne sont pas corrélés. La configuration des informations situationnelles joue un rôle important dans les jugements catégoriels. Si les cas d'entraînement incluent des exemples avec des dimensions corrélées, alors les jugements ultérieurs pourraient être biaisés dans le sens d'une utilisation de cette configuration. En revanche, si les cas d'entraînement ne comportent pas de corrélations, alors la configuration joue un rôle négligeable dans les jugements catégoriels. Si l'opérateur ne dispose pas d'information sur la pertinence des symptômes ou de critères pour les hiérarchiser, le filtrage des données s'opère soit au hasard, soit en fonction de modèles stéréotypés d'exploration, soit en fonction des caractéristiques formelles des signaux (intensité, nouveauté, position dans le champ perceptif, etc.). Au contraire, si les sources d'information sont inégalement pertinentes

pour la tâche, le filtrage se fait en fonction de la pertinence que l'opérateur attribue aux différentes informations disponibles. Si l'opérateur fait l'hypothèse que telle source d'information est plus utile que telle autre, son attention sera focalisée vers cette source, même si elle n'est pas la plus prégnante (Spérando, 1987).

1.6.3 Le diagnostic comme correction d'une déviation

Le diagnostic peut se concevoir comme une forme de raisonnement dont le but est d'identifier les causes d'un état de faits jugé anormal, de comprendre les causes des symptômes observés (Cellier, Eyrolle & Mariné, 1997). Le diagnostic est lié à la représentation que l'opérateur se fait de la situation. Un diagnostic n'est déclenché que si une déviation de l'état normal est perçue et qu'une correction est estimée nécessaire. Chez les informaticiens novices par exemple, l'information qui le plus souvent sous-tend la détection de la déviation est un message d'erreur de la machine (Allwood & Björhag, 1990). A ce stade, l'opérateur a besoin de générer des hypothèses à propos de la cause du dysfonctionnement en termes de changement dans la structure du système (Milne, 1987). Le test des hypothèses est supporté par la prise d'informations que le sujet opère et vise à isoler l'élément fautif. C'est aussi la conception du diagnostic de Mozetic (1991). Le diagnostic survient lorsqu'une observation du comportement réel entre en conflit avec le comportement attendu du système. La tâche de diagnostic consiste à identifier les composants qui, en fonctionnant anormalement, rendent compte de la différence entre les comportements observés et attendus.

Un diagnostic désigne un ensemble de composants qui doivent être en panne pour expliquer le comportement anormal du système (Nooteboom & Leemeijer, 1993). Pour Su et Govindaraj (1986), le diagnostic consiste à trouver le chemin de ces composants. Le sujet rassemble des informations à propos du système afin de trouver un ensemble de causes possibles expliquant les symptômes. Puis il essaie de trouver un ensemble de causes plus fin et un composant en panne dans la hiérarchie de l'ensemble des causes retenues. Housiaux (manuscrit) propose une décomposition en quatre phases de l'activité de diagnostic (détection, identification, résolution et vérification). Ces deux dernières conceptions (Su & Govindaraj et Housiaux) relèvent plus de descriptions de surface que de tentatives de prise en compte des caractéristiques de l'opérateur ou de ses stratégies. La décomposition du processus de diagnostic en séquences ordonnées est une conception rationnelle qui pourrait rendre compte du diagnostic d'une machine, mais pas de celui d'un opérateur humain. Dans une situation naturelle, l'opérateur utilise des connaissances heuristiques, des associations [symptôme-cause]. Ce mode opératoire se

rencontre également dans l'activité de mise au point de programmes où le processus de vérification commence par l'examen des parties du système qui ont déjà posé des problèmes (Visser, 1988). Ce processus est au centre de l'activité du diagnostic de l'opérateur humain et ce n'est qu'une fois que des associations ont été testées et que le constat de leur inadéquation a été effectué que le diagnostic "remonte" depuis le niveau des automatismes au niveau des connaissances.

Pour Pazzani (1987), il existe deux approches alternatives dans le diagnostic. La première consiste à comparer le fonctionnement du système observé au fonctionnement attendu, afin de détecter une variation. L'approche alternative consiste à encoder des associations entre comportement inhabituel du système et composants en panne en tant que règles heuristiques. Cependant, les deux approches de Pazzani présentent l'une comme l'autre des inconvénients importants. L'approche comparative ne peut être appliquée que dans le cas d'un système statique ou dans un système dynamique dont la vitesse d'évolution permet une mise à jour des informations en temps réel. Dans un système hautement dynamique, la rapidité d'évolution du processus remet en cause l'applicabilité d'une telle méthode. La deuxième approche offre l'avantage de ne pas être supportée par un raisonnement contrôlé. Son action de diagnostic est puissante puisqu'elle désigne immédiatement des composants candidats à la panne mais un grand nombre de cas de figure doivent être connus.

Le diagnostic s'arrête souvent quand un composant en panne est trouvé et remplacé. L'opérateur n'a pas besoin de comprendre le système au-delà de ces composants en panne. Il ne cherche pas à comprendre ce dont il n'a pas besoin pour satisfaire ses objectifs (Rasmussen & Jensen, 1974 ; Amalberti, 1996). Une connaissance fonctionnelle du système est souvent requise pour dépanner mais une connaissance détaillée de la façon dont chaque fonction est réalisée physiquement est souvent inutile (Schraagen & Schaafstal, 1996). De ce point de vue, la position de Samurçay et Hoc (1996), pour lesquels une des dimensions de l'expertise est la capacité à construire et coordonner différents niveaux d'abstraction, s'éloigne d'une conception pratique du raisonnement humain selon laquelle des séquences de décision simples et rapides seraient les plus représentatives de la cognition humaine (Rasmussen & Jensen, 1974).

1.6.4 Le diagnostic comme activité de classification

Le diagnostic peut se concevoir comme une activité de classification. La détection de la déviation peut être considérée plutôt comme un pré-requis que comme la composante centrale de l'activité. On peut schématiser le diagnostic comme la détermination de la valeur d'une situation sur la dimension normal/anormal. On se trouve alors dans un contexte binaire où la situation nécessite ou ne nécessite pas de correction. Le diagnostic en tant que classification consiste à apparier les symptômes perçus à un ensemble d'informations mémorisées qui vont servir de cadre interprétatif et d'outils de prescription d'actions correctrices ou de compréhension. C'est le cas du diagnostic clinique (Ben-Shakar, Bar-Hillel, Bilu & Shefler, 1998) et surtout de la résolution de problème médicaux où l'étude du diagnostic constitue une grande partie des recherches (Medin, Altom, Edelson & Freko, 1982 ; Kuipers & Kassirer, 1984 ; Boshuizen, Hobus, Custers & Schmidt, 1991 ; Brooks, Norman & Allen, 1991 ; Hassebrok & Prietula, 1992 ; Mumma, 1993 ; Arocha & Patel, 1995 ; Custers, Boshuizen & Schmidt, 1996 ; Simpson & Gilhooly, 1997) et dans lequel les symptômes perçus renvoient à une classe de maladies ou à un pattern connu (Norman, Brooks & Allen, 1989).

Dans les situations de travail, le diagnostic est impliqué dans toutes les décisions d'action qui peuvent dépasser la classification qui, pour certains auteurs, reste le centre de l'activité de diagnostic (Hoc & Amalberti, 1994, 1995). Le diagnostic implique la distinction d'un cas par rapport à l'autre, de séparer un item pertinent du contexte général. La tâche de base dans le diagnostic médical est de placer des entités dans des classes appropriées (Caverni, 1991). Cette classification s'opère à partir des propriétés de l'objet qui est soit comparé à un prototype d'une catégorie soit estimé au moyen d'une règle du type [*Si le trait x est présent, Alors cet objet appartient à la catégorie Y*] (Smith & Sloman, 1994). L'identification des traits de l'objet ne va pas de soi. Elle pourrait être dépendante du type d'apprentissage qu'a reçu le sujet et qui détermine en partie les informations recherchées (Schyns, 1998 ; McKenzie, 1998).

Les items qui ont des propriétés similaires sont rassemblés et les propriétés qu'ils ont en commun deviennent les propriétés de la catégorie (Bainbridge, 1993). Dans ce sens, le diagnostic est relié à la catégorisation, à l'étiquetage (Rasmussen, 1993a). Cette activité de classification suppose l'existence d'indices de catégorisation pertinents qui peuvent être contenus dans des règles. L'application de ces règles canoniques, dans le cas du diagnostic médical, peut se révéler insuffisante si le médecin n'est pas capable de juger les différents traits spécifiés par les règles (Brooks, Norman & Allen, 1991). On peut alors déclencher un diagnostic où les symptômes désignent une maladie particulière au lieu de pointer vers une classe de maladies. Les novices seraient plus soumis que les experts à ce type d'erreur (Arocha & Patel, 1995).

1.6.5 Le diagnostic comme composante de la prise de décision

Selon Svenson (1990), il y a deux classes de situations de prise de décision. La première concerne des situations où le sujet doit effectuer un choix entre plusieurs situations alternatives. La seconde renvoie aux situations où (a) l'évolution de la situation en cours est estimée non satisfaisante ou au cas de figure où (b) la situation en cours est acceptable mais une alternative est estimée préférable. La résolution de problème en général et le diagnostic en particulier peuvent être des cas d'application de ces deux classes de situations de décision. Dans le diagnostic, la première classe concerne les situations où l'action est nécessaire. Il faut modifier l'état du système (un moteur, un patient, etc.) et choisir des actions appropriées (réparation, médication, etc.). La seconde classe concerne des situations d'ajustement ou de réglage, avec une anticipation éventuelle de l'état futur du système justifiant une modification.

Dans le cas où l'opérateur doit mener une action qui implique le choix parmi plusieurs situations alternatives, Ohlsson (1996) propose le terme de tâche séquentielle multi-options. Elle peut se décrire comme une structure en arbre avec des noeuds correspondant à des situations et des liens correspondant à des actions. Le noeud racine représente la situation initiale et les noeuds des extrémités représentent les états finaux. Conduire une tâche revient à traverser cette arborescence de la racine au but. En traversant l'arborescence, le sujet observe la situation (les noeuds), décide de l'action à entreprendre (la branche) et agit. C'est un cycle *perception-décision-action*. Dans la phase perceptive de ce cycle, toutes les règles pertinentes pour l'action sont activées en parallèle. Une règle devient active si toutes les caractéristiques dans ses conditions d'application sont perçues comme présentes dans la situation en cours. Dans la phase de décision, une ou plusieurs règles sont sélectionnées pour l'exécution. On admet que chaque règle est associée à une force qui reflète son usage passé, que la sélection est probabiliste et que la probabilité de sélection d'une règle est fonction de sa force.

Le diagnostic peut être déterminé par la prise de décision (Hoc & Amalberti, 1994) dans deux cas de figure. Le premier cas concerne l'évocation ou la construction de représentations opérationnelles. L'opérateur privilégie les représentations qui lui permettent d'accéder directement à des connaissances procédurales. C'est le cas notamment dans la conduite d'un processus rapide. Le second cas concerne la détermination par des systèmes d'attente. Toute intervention de l'opérateur est justifiée par un but d'obtention d'une évolution. Mais les humains ne font pas toujours des jugements selon des modèles normatifs. Ils emploient plutôt des règles intuitives (Lucas, 1987). Rasmussen (1993a) opte pour une approche basée plus sur les actions et les buts de l'opérateur que sur les connaissances qu'il met en oeuvre. Pour cet auteur, le sujet

analyse la situation, sélectionne un but et planifie les actions à entreprendre. Rasmussen affirme cependant que le diagnostic n'est pas uniquement une tâche de décision. C'est aussi une activité reliée à un choix d'action. Le diagnostic pour l'action n'est pas une catégorisation théorique de données observées, mais une recherche d'informations à sélectionner. Pour certains auteurs, les données situationnelles extraites servent à récupérer des procédures d'action. La prise de décision devient alors un appariement de traits qui est la reconnaissance d'une familiarité de la situation en cours avec une classe de situations plutôt que le rappel d'occurrences particulières. C'est ce qu'ont constaté Kaempff, Klein, Thordsen et Wolf (1996) dans l'étude de la prise de décision d'officiers aux commandes d'un système de lutte antiaérienne à bord d'un navire de surface.

Dans la prise de décision, les actions sont menées en rapport à un objectif. Dans la majorité des cas de prise de décision naturelle, cet objectif doit être morcelé en sous-buts. C'est ce que permet la planification. Elle renvoie à l'élaboration et à l'exécution de plans. Elle est essentielle dans la conduite d'activités complexes où la tâche, pour être effectuée, a besoin d'être décomposée en buts et sous-buts. Richard (1990) distingue :

- . la planification descendante, qui définit les sous-buts à partir d'un but général, traite les interactions entre buts et l'ordonnancement des sous-but et particularise un but (c'est à dire définit un mode particulier de réalisation).
- . la planification ascendante, qui consiste à mettre en oeuvre un plan en même temps qu'il est construit. Cette planification se compose de l'évocation et l'adaptation d'un plan connu, de l'abstraction d'un plan à partir de l'explicitation de procédures en cours d'élaboration et de la remise en question du plan à la suite du constat de son inadéquation.

Amalberti (1996) ajoute un 3ème type de planification qu'il qualifie d'opportuniste. C'est un compromis entre planification ascendante et planification descendante où l'opérateur en situation de conception, par exemple, construit un plan et l'adapte en fonction de l'évolution de la situation. Pour mettre en oeuvre une démarche de planification, il est indispensable d'avoir des connaissances avancées sur la situation. Le savoir doit être conceptualisé, c'est à dire qu'il doit pouvoir être explicité dans des conditions qui ne sont pas celles de sa mise en oeuvre (Richard, 1995) car des connaissances procédurales suffisantes pour contrôler l'activité deviennent insuffisantes pour développer une démarche de planification (Richard, 1990). Un plan ne revêt pas toujours le statut de plan d'action, bien qu'il soit utile pour l'action (Nguyen-Xuan, Richard & Hoc, 1990). C'est le cas du joueur d'échecs duquel on dit qu'il a un plan. En fait, le joueur dispose d'un objectif plutôt que d'une suite d'actions. Un plan, même procédural, n'est pas toujours détaillé au niveau requis pour l'action car le nombre de possibles à prendre en compte dans une tâche de planification rend parfois impossible la construction d'un plan exhaustif.

Un plan est composé d'une hiérarchie de schémas (Amalberti, 1992). Il ne doit pas être trop général (il serait trivial), ni trop détaillé (il serait remis en cause). Les plans sont quelquefois décomposés en sous-structures, ce qui facilite leur utilisation. Un plan peut être rationnel. Il s'agit alors du choix d'un déroulement de l'action qui résultera en un bénéfice matériel ou psychologique pour le sujet. Pour être rationnel, un plan n'a pas besoin d'être fondé sur une considération élaborée de toutes les alternatives possibles et leurs conséquences (Reason, 1987b). C'est une procédure logique pour atteindre un but, en satisfaisant des contraintes de rentabilité, d'efficacité ou encore de rapidité. Ces contraintes peuvent être qualifiées d'externes dans la mesure où elles ne sont pas celles que l'opérateur s'impose. Ce peut être le cas d'un livreur qui doit rentabiliser ses déplacements pour effectuer ses livraisons en parcourant le moins de distance possible (Roucairol, manuscrit). Cette contrainte n'est pas celle du sujet, mais celle imposée indirectement par sa tâche. Livrer tous les clients ne suffit pas (contrainte directe). Il faut rentabiliser les déplacements (contrainte indirecte). Des contraintes internes pourraient être trouvées dans la démarche de planification d'un opérateur fictif libéré de toute obligation si ce n'est celle d'accomplir sa tâche. La planification devient le produit exclusif de l'opérateur. Cette distinction nous permet d'aborder la question de la personnalisation de plans. Dans son travail, même s'il est codifié et que des procédures existent, le sujet humain développe des modes opératoires individuels. Le but recherché est une adaptation de la procédure à des habitudes de travail. Comme le fait remarquer Hoc (1996), ces adaptations de procédure sont des violations quand les déviations opérées sont volontaires. Dans le cas de violations de procédure dans un dépannage, le risque est une perte de temps ou un échec. Dans le cas de la violation de consignes de sécurité, le risque concerne la santé des personnes. L'exemple que donne l'auteur est celui d'une réparation sur un processus continu sans l'interrompre, pour gagner le temps de la remise en service.

Le type de planification développé par un sujet varie en fonction de son degré d'expertise dans le domaine considéré. Si le sujet est peu expérimenté, on peut croire qu'il mettra en oeuvre une planification ascendante, dans laquelle le plan sera ajusté par feed-back. La planification descendante implique que la situation qui a servi à créer le plan est connue voire maîtrisée. Dans ce cas de figure, le sujet extrait des indices qui lui servent à récupérer ce plan. Une fois instancié, celui-ci est déroulé jusqu'au but. La planification descendante offre un plan déjà utilisable qui limite les ressources utilisées, permet un ajustement en temps réel et un contrôle efficace de l'action en cours. La mise en oeuvre d'un plan récupéré suppose une automatisation au moins partielle de l'activité et les indices situationnels qui font avancer le déroulement du plan sont extraits avec un très faible niveau d'attention. Si ce n'était pas le cas, la planification serait ascendante, avec des indices extraits de façon contrôlée et la suite du plan élaborée de façon incrémentielle. Dans la planification descendante, on peut imaginer un processus de va-et-vient

entre les indices que l'activité génère et le degré d'avancement du plan. A l'étape n , le sujet active le plan et déclenche les opérations prescrites. Le résultat de ces actions sert d'indices de déclenchement de l'étape $n+1$ du plan, etc. Cette vision des choses implique que d'une part, le plan n'est pas déroulé d'un seul coup et que d'autre part, des ajustements sont possibles pendant les étapes de sa mise en oeuvre.

Schraagen et Schaafstal (1996) abordent le concept de planification sous l'angle stratégique. La connaissance stratégique (savoir quoi décider, quoi faire et quand) est applicable dans plusieurs domaines et l'aspect central concerne la pertinence de l'action dans la tâche en cours. Lorsque la situation est dynamique et que son rythme d'évolution est rapide, les actions menées doivent être choisies en fonction de leur adéquation à l'état de la situation en cours ou en fonction de l'évolution supposée de cet état. On rejoint ici la conception du système cognitif humain selon Hoc (1996), pour qui la caractéristique essentielle de l'opérateur humain est sa tendance anticipatrice plutôt que réactive. Lorsqu'il s'agit de piloter un processus dynamique rapide, la planification des buts doit intégrer l'évolution de ce processus. Cette planification à long terme ne repose pas sur des indices présents mais sur une probabilité d'apparition de données futures. L'ajustement du plan devient difficile. Au mieux se fait-il en différé. L'état présent de la situation permet d'inférer l'état futur. Cette inférence permet de réviser le plan avant qu'il soit appliqué. Dans une situation statique, la planification peut être rétroactive. Le plan est instancié au coup par coup, à mesure qu'il est déroulé. Dans une situation dynamique, l'ajustement du plan devient proactif et précède l'état de la situation dont il planifie le traitement. C'est le cas dans la conduite d'un processus tel que le haut fourneau (Hoc, 1989, 1991) ou du pilotage d'avion de combat (Amalberti, 1991b, 1992, manuscrit).

1.6.6 Une composante du diagnostic : la dynamique

Sur la base de leurs propriétés d'évolution dans le temps, on peut isoler deux grandes classes de situations dans lesquelles le diagnostic est présent. La première classe concerne des systèmes qui ne fonctionnent plus. Dans ce cas de figure, la situation est statique, sans contrainte de temps inhérente au système (Hoc, 1996). C'est le cas typique du dépannage. Le diagnostic n'évolue qu'en fonction des opérations et il faut trouver la cause des symptômes perçus. La seconde classe de situations concerne des systèmes qui fonctionnent et sur lesquels l'opérateur doit intervenir. On se trouve alors dans une situation dite dynamique. C'est le cas de la conduite d'un réacteur nucléaire (voir Joblet, 1997), d'un haut fourneau (voir les recherches de Hoc), du pilotage d'un avion (voir les recherches d'Amalberti), de la lutte contre les incendies (voir les

recherches de Brehmer), etc. Dans les situations dynamiques, le diagnostic est une composante de l'activité. Il faut continuer la conduite du système afin de le maintenir dans des conditions normales ou ralentir la dégradation de ses conditions de fonctionnement.

Une situation dynamique se définit par une série de décisions interdépendantes, un environnement changeant dans le temps et des décisions qui changent l'état du problème (Brehmer, 1987, 1996 ; Gibson, Fichman & Plaut, 1997). La décision dans ce type de situations est dépendante de la longueur des constantes de temps (le système peut être découpé en cycles plus ou moins longs), du nombre de variables et des relations qu'elles entretiennent entre elles (Bainbridge, 1993) et de la disponibilité d'un feed-back. Dans les tâches dynamiques, les sujets décident non seulement de ce qu'il faut faire et comment le faire, mais également de quand acquérir plus d'information sur les valeurs des paramètres du système ou de quand entreprendre une action et ajuster le système (Kersholt, 1995). La sélection de l'action la plus adaptée à la situation en cours est un des aspects importants des environnements dynamiques (Rasmussen, 1993b). Ce choix est fortement dépendant de la représentation du système par l'opérateur. Dans le cas de la conduite d'un réacteur nucléaire embarqué, Joblet (1997) isole 9 approches de conduite différentes qui vont chacune déterminer une représentation spécifique du système. Par exemple, les approches basées sur les événements vont induire une représentation du système en tant que chaîne de fonctions causales alors que l'approche par circuit va induire une représentation plutôt topographique. Les différentes approches doivent être combinées afin d'assurer une certaine complémentarité dont dépendent les choix d'actions de l'opérateur.

La dynamique peut se concevoir comme un continuum en bas duquel la situation ne peut subir aucune transformation de la part de l'opérateur (c'est le cas d'un diagnostic de panne dans un réseau formel. Cf. § 1.6.1 Diagnostic sur réseau formel). A l'autre extrémité de ce continuum, on trouve des situations qui évoluent en fonction des actions de l'opérateur, soit en temps réel, soit en décalage par rapport au temps de l'action (cas du haut fourneau : Hoc, 1991). La dynamique impose à l'opérateur de corriger les problèmes causés dans des décisions antérieures par des décisions futures. Un tel processus de décision adaptatif est dépendant du temps dans un environnement changeant de manière autonome et en fonction des décisions de l'opérateur (Pascoe & Pidgeon, 1995).

1.6.6.1 La gestion des ressources

Le diagnostic a longtemps été considéré comme une activité réactive et contemporaine à la survenue du problème (Hoc & Amalberti 1995). Les études sur le contrôle de processus

rapides ont montré que le contrôle peut être anticipatif, en simulant des types d'événements par avance, en imaginant des problèmes de diagnostic et en préparant des plans de réponse. C'est la remarque que ces auteurs adressent à Rasmussen, en reprochant à sa modélisation de l'opérateur d'être trop réactive et de ne pas inclure suffisamment l'anticipation. Dans les situations dynamiques, les opérateurs ne font pas que réagir (à un signal, une alarme, etc.) en produisant des réponses associées. Ils produisent une réflexion complexe afin de construire des vues d'ensemble sur des états présents et futurs du processus (Bainbridge, 1993). En situation dynamique, le diagnostic est loin d'être atemporel. Il est soumis aux contraintes d'une situation évolutive. L'opérateur cherche à rester dans une situation dans laquelle il peut toujours agir. Ceci implique une gestion des ressources attentionnelles et des moyens d'action, une gestion des risques et une gestion des coûts (Amalberti, 1992 ; Hoc & Amalberti, 1994). Cette triple gestion n'est pas figée. En fonction de la situation, on peut supposer une redistribution des priorités, voire l'abandon de l'une de ces trois gestions (le risque, par exemple). Un acteur de cette variabilité est l'opérateur lui-même et ses caractéristiques personnologiques (Lawton. & Parker, 1998). Par exemple, en situation de prise de décision, Lopes (1987, citée par Pascoe & Pidgeon, 1995) recense deux types de sujets : un *risk seeker*, qui oriente sa stratégie vers le rendement en acceptant de prendre certains risques et un *risk averse*, qui traite la situation en contrôlant les risques et en recherchant la sécurité des actions. Cette variabilité de stratégie conduit à une variabilité de conduites. Aux commandes d'une simulation de processus de distillation, les sujets *risk seekers* prennent plus de risques, agissent plus et produisent plus que les sujets *risk averse* (Pascoe & Pidgeon, 1995). Précisons, pour conclure sur la question de la gestion des ressources cognitives, que ce concept ne fait pas l'unanimité. Pour Richard (1997), c'est une notion floue qui néglige le fait que le contrôle de l'activité a une composante de prise d'information et de sélection. Pour cette raison au moins, l'auteur préfère la notion d'attention pour expliquer le contrôle de l'activité.

1.6.6.2 La gestion des incidents

La survenue d'incidents en situation dynamique implique de faire des choix d'actions rapides. Pour Decortis, (1993) la stratégie principale des opérateurs consiste à prendre des décisions sur la base d'indices de similarité et/ou de fréquence. Une des préoccupations est d'amener le système à un état fixe. Cette stratégie de décision semble s'accompagner de processus contrôlés sous la forme d'une décomposition en sous-problèmes. Cette proposition de Decortis laisse à penser que même en conditions de contrainte de temps et de charge importante, les opérateurs utilisent des traitements contrôlés et construisent des inférences. Pourtant on sait que les experts en situation d'urgence (les responsables de plates-formes offshore, pour notre

exemple) basent en partie leur prise de décision sur la reconnaissance de caractéristiques situationnelles. Pour ces sujets, il est plus important de parer au plus pressé plutôt que de rechercher une réponse optimale (Flin, Slaven & Stewart, 1996). Ce mode de prise de décision s'accommode mal d'une décomposition en sous-problèmes. La prise de décision séquentielle, si elle est impliquée dans le traitement des situations d'incident, ne concerne probablement que les cas de faible niveau d'urgence. Dans les situations d'accidents où des vies sont en jeu et où l'évolution de la situation échappe à un contrôle immédiat, les opérateurs doivent rapidement mettre en oeuvre des connaissances compilées afin de réagir dans un minimum de temps. La gestion des ressources peut alors se concevoir comme une distinction ressources internes (aspect cognitif individuel du décideur) / ressources externes (moyens matériels et humains mis en oeuvre). Un des paramètres clé de ce type de situation est la coordination au sein de laquelle les communications jouent un rôle prépondérant pour transmettre les décisions et obtenir un feedback sur une situation distante dans l'espace et dans le temps (Dowell, 1995 ; Flin, Slaven & Stewart, 1996).

1.6.6.3 Echelles de temps

Le temps est un des déterminants importants de la prise de décision. Samurçay et Hoc (1996), tout comme Svenson (1990), classent les situations de diagnostic en fonction de la configuration de la situation dans le temps, mais avec une composante de planification. Selon eux, l'opérateur doit savoir si une intervention doit être effectuée immédiatement, dans le futur ou s'il existe une déviation susceptible de causer une panne. La prise de décision naturelle est caractérisée par des conditions continuellement changeantes. Puisque les conditions sont dynamiques, certains buts et sous-buts doivent être redéfinis quand de nouvelles informations sont reçues et la priorité des buts et sous-buts est susceptible de changer quand la situation se redéfinit (Randel & Pugh, 1996). Les opérateurs doivent constamment mettre à jour leur représentation de la tâche de contrôle à accomplir et la priorité à lui accorder. Les représentations d'environnements dynamiques doivent représenter les changements en respectant à la fois les tâches de contrôle courantes et l'information ainsi que la connaissance associée au succès de l'accomplissement de ces tâches (Sundström, 1993).

Le fait que des décisions doivent être prises en temps réel est l'aspect central des tâches de prise de décision dynamiques (Dubois, 1992) mais le sujet doit également traiter la tâche sur une échelle de temps pertinente (Brehmer & Svenmark, 1995). Cette échelle définit le rythme des actions menées. Elle est incluse dans une échelle de temps plus large qui est celle du processus qui contient la tâche. Pour Brehmer et Svenmark, qui étudient les stratégies de lutte contre les

incendies, il existe une échelle de temps qui concerne les différents foyers et une échelle de temps qui concerne l'évolution du feu dans sa globalité. Dans ce cas de la lutte contre le feu, même au niveau local, le sujet doit prendre en compte l'évolution du feu en tant que tout. Dans le cas d'une tâche de supervision d'un système complexe (une chaîne de production, par exemple), la prise en compte de la totalité du processus permet d'en reconsidérer les étapes et de prévoir les conséquences d'un dysfonctionnement local sur l'ensemble de celui-ci.

1.6.6.4 Pathologie de la prise de décision

La dynamique implique des traitements parallèles ou du moins en temps partagé¹² (Hoc & Amalberti, 1994). Les ressources doivent être réparties entre les diverses composantes de l'activité et des habiletés métacognitives de supervision et de gestion des ressources doivent être mises en oeuvre (Gaba, 1991). C'est dans ce contexte que peuvent apparaître certaines formes d'erreur dans le processus de décision. La lourdeur des traitements et les contraintes qu'imposent certaines situations peuvent être à l'origine de ce que Brehmer (1992) appelle *pathologie de la prise de décision*, qui peut revêtir trois formes :

- . le vagabondage thématique (passer d'un problème à un autre sans les résoudre) ;
- . l'enkystement (ne résoudre que des problèmes que l'on croit être de sa compétence) ;
- . le refus de décision.

La pathologie de la prise de décision est probablement liée à la charge que subit l'opérateur. Cette charge est généralement forte dans les situation dynamiques dans la mesure où les informations traitées, les valeurs des paramètres et les échelles de temps subissent des transformations continues. Le diagnostic, dans un tel contexte ne consiste plus seulement à trouver les causes d'un dysfonctionnement mais à en prédire les effets (Cellier, Eyrolle & Mariné, 1997).

1.6.7 Le diagnostic comme activité de contrôle et de supervision

Le diagnostic de panne est une détection d'un dysfonctionnement alors que le contrôle est une vérification de la normalité (Housiaux, manuscrit). Le diagnostic est présent dans le contrôle de processus au titre de la vérification des sorties du système et de leur comparaison à un groupe de valeurs servant de critères d'évaluation. Les décisions d'action sur le système sont

prises sur la base des résultats du diagnostic (Cuny, 1979). Dans les tâches de supervision, il faut contrôler le système et détecter les dysfonctionnements possibles. C'est ce que Cellier, Eyrolle et Mariné (1997) appellent le *monitoring*. Dans une chaîne de production, cette activité vise des objectifs de rendement, de conditions de fonctionnement optimales et de sécurité (Bainbridge, 1993). L'efficacité de l'opérateur dans cette tâche dépend de la connaissance qu'il a des états normaux et anormaux du système, de son évolution et de sa propre capacité à se centrer sur les sources potentielles de dysfonctionnement. Des recherches d'explications peuvent être lancées sur les points que la représentation du système ne peut expliquer et ce, tout en continuant à piloter le système (Amalberti, Bastien & Richard, 1995).

Pour Boreham et Patrick (1996), identifier les déviations de l'équilibre du système et diagnostiquer son état est subordonné à l'activité de supervision. La tâche de diagnostic est confondue avec celle qui consiste à prédire l'évolution du système. Les deux façons de penser contribuent à la compréhension générale de la situation sur laquelle l'action correctrice est menée. Contrôle et diagnostic sont étroitement liés dans les situations naturelles. Le résultat d'un contrôle peut servir d'indice de déclenchement à une séquence de diagnostic. Si la vérification de la normalité aboutit à la conclusion que la situation n'est pas normale, alors un diagnostic peut être déclenché. Une fois le diagnostic terminé, le contrôle joue le rôle de confirmation du retour à la normale. Dans un système physique dont l'état est contrôlé par des capteurs, des changements de valeur affectent directement les actions du contrôleur du système (Lee, 1994). Dans ce cas, le contrôle a un statut de diagnostic. Il est utilisé pour détecter les causes d'une variation dans l'équilibre du système.

L'anticipation joue un rôle clé dans les situations de contrôle puisque la situation vécue n'est jamais tout à fait celle à laquelle l'opérateur s'attend. Pour Boudes et Cellier (1998), l'anticipation permet d'évaluer mentalement un état futur de la situation mais cette seule analyse est insuffisante. La prise en compte du passé est nécessaire pour connaître l'historique de la situation contrôlée. Dans le cadre de la situation qu'ils étudient (le contrôle du trafic aérien), Boudes et Cellier avancent le concept de champ d'anticipation qui désigne l'ensemble des éléments situationnels considérés par un opérateur pour anticiper l'évolution d'un processus dans un horizon temporel donné. Dans le cas des contrôleurs aériens, ce champ peut comprendre le coéquipier lui-même pour lequel certaines actions de préparation d'information sont effectuées. L'anticipation, au travers du contrôle du processus peut donc inclure des acteurs de ce contrôle.

¹² Les traitements dits parallèles reposent probablement sur des processus fonctionnant en temps partagé. On peut cependant admettre que certaines activités motrices se déroulent pendant l'exécution de traitements essentiellement cognitifs, comme dans le cas de la dactylographie (voir Gentner, 1988).

Dans une tâche de contrôle et de surveillance typique, un groupe d'opérateurs humains contrôle un système avec les capacités offertes par les outils de contrôle et de surveillance. Une caractéristique de cette situation est que les informations nécessaires au contrôle n'apparaissent pas forcément à l'interface homme-machine. Les opérateurs doivent parfois les rechercher pour estimer les états du système. Avec la complexité croissante des systèmes à contrôler, le rôle de l'opérateur a progressivement migré depuis un contrôle manuel direct vers un rôle de supervision avec des tâches définies et avec une plus grande liberté pour l'opérateur de choisir sa propre stratégie pour atteindre le but (Cacciabue & Kjaer-Hansen, 1993). Les traits dominants des systèmes modernes de contrôle et les stratégies les plus souvent appliquées pour la conception de procédures de gestion d'usine sont basés sur trois points. Le premier concerne l'usage extensif de la technologie de l'information pour contrôler tous les systèmes de supervision et d'interface. Le deuxième point renvoie au changement des responsabilités de l'opérateur, qui est déplacé du contact avec le processus en cours vers un rôle de contrôle distant. Le dernier point concerne la complexité des événements, qui nécessite un haut degré de qualification et des connaissances abstraites sur le système de façon à faire face à des événements nouveaux ou non familiers (Cacciabue, 1991).

1.6.7.1 Gestion de compromis en contrôle de processus : l'exemple de l'anesthésie

La définition de Cacciabue (1991) des systèmes de contrôle peut s'appliquer à une situation de contrôle d'un processus industriel bien qu'on puisse trouver des analogies avec le travail de l'anesthésiste. L'anesthésie comporte une part de technologie importante (notamment en ce qui concerne les outils de mesure de l'état du patient), un contrôle indirect du patient via des instruments (en plus des signes cliniques visuels) et implique des connaissances avancées en médecine et dans les processus chimiques impliqués par l'emploi des différentes substances anesthésiques. L'analogie avec le contrôle de processus est assez directe (De Keyser & Nyssen, 1993). L'anesthésiste induit des états (sommeil du patient), contrôle l'équilibre de ces états, surveille, diagnostique et récupère des incidents. Une caractéristique importante de l'activité est qu'elle se déroule en collaboration avec un chirurgien. Cette collaboration implique la gestion d'un compromis. Pour De Keyser et Nyssen, *"plus l'aisance du chirurgien est garantie (par exemple par le relâchement des muscles par le curare), plus la marge de manoeuvre dans laquelle se meut l'anesthésiste est étroite. Plus le chirurgien est pressé, plus le conflit avec le travail précis, minutieux de l'anesthésiste peut éclater, incitant les anesthésistes novices, sans statut comparable à celui du chirurgien, à prendre des risques"* (p. 249).

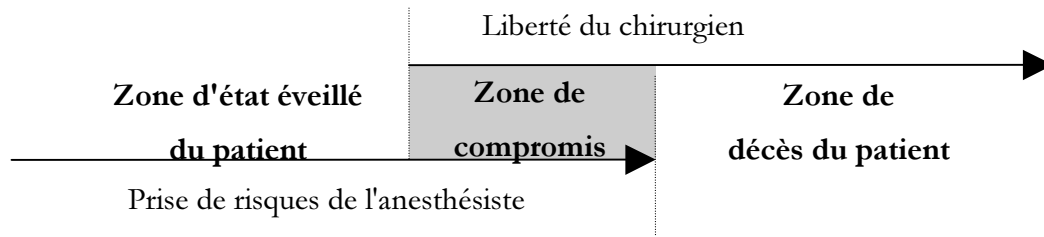


Figure 12 : Proposition de gestion des risques en anesthésie.

Le compromis que doit gérer l'anesthésiste concerne le chirurgien et le patient. Pour garantir un travail efficace du chirurgien, l'anesthésiste doit diminuer la marge de sécurité qu'il s'accorde. La gestion de ce compromis peut s'apparenter à la recherche d'un équilibre implicite dont les marges sont définies par l'exigence du travail du chirurgien et la sécurité du patient. En deçà d'une prise de risques minimum (endormir le patient), le chirurgien ne peut pas travailler. L'anesthésiste doit faire courir le risque de l'anesthésie au patient pour que celui-ci soit opéré. Son rôle, en tant que contrôleur, est de gérer ce risque. La difficulté du rôle de l'anesthésiste réside dans le fait que la sécurité du patient et la liberté d'actions du chirurgien sont des objectifs contradictoires qui doivent être conciliés durant le temps de l'intervention.

1.6.7.2 Les situations d'apprentissage implicite

L'étude des processus cognitifs à l'oeuvre dans d'une tâche de contrôle peut être menée dans une situation naturelle, en étudiant des opérateurs à leur poste de travail. Il existe une méthode alternative et matériellement moins coûteuse, qui consiste à placer des sujets naïfs dans une situation de contrôle simulée. Cette approche comporte deux phases. Dans la première, on demande au sujet de contrôler un processus simulé sur ordinateur au moyen de variables quantifiables. Ce processus représente par exemple la production d'une usine fictive (une usine à sucre, telle qu'elle est nommée dans la littérature) où la tâche comporte quelques dizaines de cycles de production. L'objectif du contrôle est d'atteindre une valeur cible en agissant sur une variable (le nombre d'ouvriers au travail). Ce dispositif est représenté de manière graphique. La deuxième phase est la réponse à un questionnaire sur papier. Celui-ci se présente comme l'interface de la tâche de contrôle. Il est composé d'une série de cycles dans lesquels le sujet doit trouver la valeur de la variable pour atteindre la cible. Cette méthodologie compare les performances obtenues par les sujets à la tâche de contrôle et au questionnaire. L'ensemble des recherches utilisant cette méthodologie montre des différences entre la performance de contrôle et le score au questionnaire. L'ensemble des recherches montre que les sujets qui ont des

performances de contrôle élevées ont des performances basses au questionnaire, bien qu'il existe des données contradictoires (Jansson, 1995). Les discussions abordent la question des mécanismes d'apprentissage et cette discussion gravite autour de deux concepts : un apprentissage explicite, qui permettrait la récupération de connaissances verbalisables utiles pour répondre au questionnaire et un apprentissage implicite, qui ne permettrait pas la récupération d'informations et serait alloué à l'activité de contrôle. Certains auteurs adhèrent à cette dichotomie tandis que d'autres optent pour des interprétations alternatives excluant l'hypothèse de mécanismes d'apprentissage distincts. Pour Baddeley (1996), l'enjeu est de comprendre les mécanismes sous-jacents qui expliquent des phénomènes d'apprentissage apparemment peu sensibles à des variables telles que stratégie ou organisation.

1.6.7.2.1 Interprétations en termes de processus d'apprentissage distincts

L'interprétation selon la dichotomie des processus d'apprentissage est l'option prise par Berry et Broadbent (1988) et Cleeremans et Karnas (1988). Deux modes de traitement pourraient intervenir dans une tâche donnée. Le premier concerne l'élaboration et la consultation d'un modèle verbal de cette tâche, c'est à dire une formulation explicite d'hypothèses et de prédictions. Performance de contrôle et verbalisations à propos de la tâche seraient alors corrélées, puisqu'elles se fondent sur les mêmes représentations et sur les mêmes processus. Le deuxième mode de contrôle fait que les connaissances acquises ne sont pas accessibles à la conscience des sujets. On observe alors dissociation entre performance et capacité à verbaliser. Le traitement serait fondé sur une extraction passive de régularités dans l'environnement. Ce mode de traitement serait particulièrement adapté pour des situations mal définies, impliquant un grand nombre de variables entretenant entre elles des relations floues. Cette dichotomie est également présente chez Marescaux, Luc et Karnas (1989) et Luc, Marescaux et Karnas (1989).

Boreham, Foster et Mawer (1992) remarquent des stratégies différentes dans l'administration d'un médicament selon le niveau d'expertise du sujet. Les experts n'appliquent pas des connaissances déclaratives de type "tel patient a besoin de tant". Leur stratégie les amène même à prescrire des augmentations de dose sans savoir quelle nouvelle concentration ils obtiendront. Cette stratégie, qui repose sur l'application d'une règle plutôt internalisée, rappelle l'ajustement graduel constaté chez les opérateurs experts d'un contrôle de processus industriel. Pour un de ces auteurs (Boreham, 1994), les ressources individuelles de traitement explicite sont des systèmes symboliques internalisés : langage, mathématiques, protocoles de traitement (pour les médecins), etc. Les ressources implicites sont sub-symboliques. Elles sont composées d'un ensemble vaste de connaissances acquises par expérience et stockées en MLT. Elles constituent

un réseau de connexions entre des entrées et des sorties. Le système implicite contrôle nos réponses à l'environnement sans que celles-ci soient ralenties par le mécanisme du traitement symbolique de l'information. Ce système permet de répondre correctement à des configurations de stimulus qui excèdent la capacité de notre espace de travail et ajuste automatiquement notre comportement aux régularités de l'environnement. Les traitements explicites surviennent en cas d'échec, généralement face à une situation nouvelle.

1.6.7.2.2 Interprétations alternatives

Buchner et Funke (1993) choisissent une explication en termes d'exploration des états de transition dans une matrice des états du système. Un état de transition se compose d'un état du système à un moment donné, d'une action et d'un nouvel état. La matrice est composée de l'ensemble des états de transition. Elle décrit l'ensemble des états que peut présenter la situation. C'est sur cette matrice que Buchner, Funke et Berry (1995) fondent leur discussion. Un sujet qui obtient de bonnes performances à la tâche de contrôle atteint souvent la cible. Par conséquent, il explore souvent des états du système connus (la cible). Un sujet qui obtient de mauvaises performances à la tâche de contrôle n'atteint pas souvent la cible. Il explore souvent des états du système nouveaux. La dissociation entre performance de contrôle et score au questionnaire s'expliquerait par le fait que les sujets qui explorent peu d'états du système (les sujets à performance élevée) se trouvent, lors de la passation du questionnaire, face à des situations qu'ils ont moins de chances d'avoir déjà rencontrées que les sujets qui ont exploré de nombreux états du système (les sujets à performance faible). Dienes et Fahey (1995) optent pour une explication différente. Pour ces auteurs, chaque fois qu'une réponse est approximativement correcte, les données situationnelles et la réponse sont stockées ensemble. Pour chaque essai, tous les exemples spécifiques qui correspondent à la situation en cours entrent en compétition. Ces auteurs ont élaboré un modèle fondé sur les règles. Celles-ci entreraient en compétition pour contrôler la tâche. La règle choisie est celle qui détermine la réponse et si elle donne la cible, elle augmente ses chances d'être utilisée au tour suivant.

Pour Perruchet (1997), le terme d'apprentissage implicite hors attention est une illusion dans la mesure où l'attention est nécessaire à tout apprentissage. L'interprétation de cet auteur repose sur des changements induits dans le codage attentionnel de l'information. Dans des situations dites d'apprentissage implicite, le sujet n'apprendrait pas des règles ou des connaissances abstraites. La performance s'expliquerait par un codage efficace des informations situationnelles. Gibson, Fichman et Plaut (1997) émettent également certaines critiques à propos des situations de contrôle simulées (notamment l'usine à sucre). Pour ces auteurs, les sujets n'ont

qu'à opérer un contrôle réactif en dehors de tout délai entre les actions et leurs effets. En cela, la situation expérimentale de l'usine à sucre, en tant que contrôle de process, est réductrice au regard d'une situation de contrôle naturelle.

1.6.7.3 De l'apprentissage implicite à la théorie des schémas

L'étude des processus cognitifs à l'œuvre dans une tâche de contrôle au moyen d'un dispositif de simulation a permis de faire émerger des règles implicites de régulation auxquelles le sujet n'a accès qu'à un niveau procédural. L'activité est gérée en dehors de tout raisonnement logico-mathématique. Le contrôle est effectué par ajustement plus ou moins intuitif. Nous avons vu une présentation assez expérimentale du mécanisme d'apprentissage implicite centrée sur une activité de contrôle de processus. Des données existent également dans le cadre d'une tâche d'identification de cibles. Celles-ci sont organisées en séquences répétées. Les sujets identifient les cibles de plus en plus rapidement sans pouvoir verbaliser le fait qu'elles sont organisées en séries identiques répétées (Verlut & Koenig, 1997). La notion d'apprentissage implicite permet de rendre compte de la construction de certaines connaissances non verbalisables. Sur le terrain, l'extraction de régularités situationnelles ou le stockage d'exemplaires prototypiques d'une situation sont peut-être à la base d'un format procéduralisé - et donc non verbalisable - de connaissances. On fait allusion ici aux connaissances expertes et à la différence constatée entre ce que les sujets disent qu'ils feraient dans un cas donné et ce qu'ils font réellement (Shank & Szego, 1999). La nature de certaines des connaissances expertes est à l'origine de ce décalage. Les compétences sont apprises, pas forcément verbalisables et inobservables. On n'en observe que les manifestations (Leplat, 1991).

Les situations d'apprentissage implicite mettant en jeu le contrôle d'un processus sont une forme de diagnostic dans le sens où le sujet doit extraire des indices qui vont lui permettre de piloter un système. On se trouve dans un cas de régulation et de conservation de l'état du système mais cette façon de voir est sans doute plus vraie pour les dispositifs naturels que pour les dispositifs expérimentaux. La théorie de l'apprentissage implicite permet de renforcer l'idée qu'un sujet peut mémoriser de l'information utile à l'action sans pouvoir la verbaliser. L'idée de l'existence possible d'une compétition entre des règles de contrôle (Dienes & Fahey, 1995) va dans le sens d'une sélection des connaissances sur la base des occurrences passées. De même, l'extraction passive de régularités environnementales qui construirait de la connaissance en actes est compatible avec ce que l'on sait de la construction des schémas.

1.6.8 Les stratégies de diagnostic

1.6.8.1 Stratégie topographique et stratégie symptomatique

La recherche d'un dysfonctionnement peut se décomposer en un diagnostic symptomatique (où la localisation de la panne est faite en référence à un contenu d'information) et un diagnostic topographique (où le champ du diagnostic est une carte de l'emplacement des éléments fonctionnels) (Rasmussen, 1986, 1991). La distinction que proposent Rasmussen et Jensen (1974) et Rasmussen (1993a) entre diagnostic symptomatique et diagnostic topographique repose sur l'existence de stratégies différentes, mais également de formats de connaissances différents. Patrick (1993) oppose deux types de stratégies selon une logique identique à celle de Rasmussen. Un premier type de stratégie est supporté par une information probabiliste. L'opérateur sélectionne la cause qui, par le passé, s'est montrée la plus susceptible de déclencher les symptômes constatés. Le second type de stratégie est fondé sur une information structurale, représentée comme des liens entre différents types de noeuds. Elle indique à l'opérateur comment les pannes peuvent se propager dans le système. Elle varie non seulement d'un système à un autre, mais aussi dans un même système car celui-ci est composé de sous-systèmes reliés, qui ont leur structure propre.

Pour reprendre la terminologie de Rasmussen, un opérateur novice mettra plutôt en oeuvre une stratégie topographique, supportée par les connaissances. Ce niveau de contrôle ne permet pas d'établir des liens fonctionnels entre les éléments du système. Dans ce cas, le diagnostic est un chaînage inséré dans une représentation structurale du système. L'expert développera plutôt une stratégie symptomatique dirigée par des règles, supportée par des connaissances fonctionnelles structurées selon des objectifs d'action. Dans ce cas, le diagnostic se résume à une règle qui s'insère dans une représentation fonctionnelle du système, une association [symptôme-cause] directe. Le clivage fait ici entre topographique-novice et symptomatique-expert n'est pas rigide. Il existe des cas de figure où l'expert est confronté à une panne nouvelle pour laquelle il ne dispose pas d'association [symptôme-cause]. Il doit alors avoir recours à une recherche causale basée sur les inférences pour identifier la cause du dysfonctionnement. Le raisonnement peut alors revêtir la forme d'un chaînage (Cf. § 1.6.1 Diagnostic sur réseau formel) ou s'orienter vers le développement d'une stratégie *ad hoc*. Su et Govindaraj (1986) avancent le concept d'*Initial Feasible Set* (IFS). Ce concept désigne l'ensemble des paires symptômes-causes que le sujet considère avant que toute hypothèse soit formulée. Il reflète les paires les plus fortement associées aux symptômes. Les auteurs proposent une stratégie de type largeur-profondeur, dans laquelle les sujets effectuent une recherche large de candidats à la panne et font un test une fois qu'une hypothèse est formulée. La seconde stratégie proposée par les auteurs est

de type balancé, dans laquelle les sujets ne font pas de recherche de candidats mais formulent des hypothèses rapidement et en maintiennent plusieurs en même temps. Contrairement à l'IFS, ces stratégies seraient indépendantes du contexte.

La recherche symptomatique, qui relie les symptômes aux pannes figure parmi les stratégies les plus puissantes qu'un opérateur peut mettre en oeuvre, bien qu'elle ne soit applicable que dans un domaine étroit. C'est une stratégie de recherche de panne économique car elle réduit rapidement le nombre possible de composants en panne et avec peu de tests. Ce n'est pas une stratégie générale puisqu'elle nécessite l'accès aux divers modèles qui représentent la panne du système. Elle est dépendante de l'existence de données à propos du système, généralement acquises avec l'expérience. L'accès à une expérience spécifique est la raison pour laquelle les recherches symptomatiques sont plus économiques que les recherches topographiques puisque une panne peut amener un opérateur à un composant défectueux en peu de tests. Ce type de diagnostic nécessite la connaissance du système et la disponibilité de connaissances reliées à des possibilités d'interventions. C'est typiquement le mode opératoire développé par les opérateurs experts qui commencent le diagnostic par l'examen des associations symptômes-causes dont ils disposent en mémoire (Milne, 1987). Sanderson (1990) analyse la recherche symptomatique dans les mêmes termes. C'est un processus de reconnaissance de pattern dans lequel les symptômes observés sont comparés aux patterns stockés en mémoire afin de trouver une correspondance qui indiquera une panne particulière.

La recherche topographique est plus générale et moins économique que la recherche symptomatique. Elle est plus générale car elle n'est pas reliée à des états de panne. Le manque d'économie repose sur le fait que cette stratégie n'utilise pas la probabilité de panne de certains composants et qu'elle est supervisée par un niveau de contrôle basé sur les connaissances qui implique des traitements lourds et nombreux (Schaafstal, 1993 ; Fath, Mitchell & Govindaraj, 1990).

Du point de vue de la rapidité et de la rentabilité, l'intérêt est grand de réduire l'ensemble des possibles dans le diagnostic, surtout lorsqu'on s'est engagé dans une série de tests topographiques. Une des solutions pour y parvenir est l'utilisation du split-half (Chen & Srihari 1994). C'est une opération de diagnostic qui vise à scinder l'ensemble des composants du système en deux parties : une partie qui contient la panne et une partie qui ne la contient pas. Soit un ordinateur de bureau dont l'écran n'affiche rien. Il peut s'agir d'une panne d'écran, d'une panne d'unité centrale ou des deux. Si on remplace l'écran par un autre que l'on sait être en état de fonctionner et qu'il affiche quelque chose, l'unité centrale fonctionne et l'ancien écran est en panne. Si le nouvel écran n'affiche rien, l'unité centrale (et éventuellement l'ancien écran) est en panne. Les plus anciennes études expérimentales du diagnostic datent de la fin des années 50. On

y relève une conception désormais obsolète de la cognition humaine. Que ce soit chez Goldbeck *et al.* (1957) ou Dale (1957), la stratégie plébiscitée par les auteurs est le split-half. Pour ces auteurs, c'est cette stratégie qui permet d'isoler les composants en panne de la façon la plus économique en termes de nombre de tests. La conception du diagnostic qui prévaut dans ces études repose sur une activité cognitive essentiellement hypothético-déductive dans laquelle *"les méthodes logiques sont le meilleur moyen d'accomplir le travail"* (Dale, 1957, p. 360). Cette assertion est partiellement justifiée par le type de tâche étudiée (des réseaux formels, voir Figure 8 et Figure 9). Le split-half peut être vu comme une stratégie à part entière. Cependant, sa fréquence d'utilisation ne serait pas très élevée. Konradt (1995) note, dans une étude sur le diagnostic de panne dans un processus de fabrication contrôlé par ordinateur, que des experts (N=182 sujets) qui ont plus de 20 années d'expérience dans leur activité n'utilisent le split-half que dans 1,1 % des cas. La stratégie la plus utilisée est une recherche d'informations portant sur la survenue d'une panne similaire dans le passé, soit à l'aide d'un support (documentation, par exemple) soit de mémoire. C'est ce que Konradt appelle la recherche d'informations historiques. Il s'agit d'un raisonnement semblable au raisonnement par analogie, où l'opérateur cherche les conditions d'application d'une solution antérieure.

Le split-half est une méthode de réduction de l'ensemble des possibles qui serait adapté par exemple au diagnostic par un algorithme (Davis, 1984). Il se prêterait alors à un rôle d'élimination de catégories de pannes ou au traitement de tâches simples dans lesquelles les occurrences de dysfonctionnement sont équiprobables parmi les composants du système. Dans une tâche naturelle, cette probabilité varie d'un composant à l'autre. La panne peut être isolée dans un sous-système grâce au split-half mais celui-ci ne suffit pas à expliquer la performance experte.

1.6.8.2 Stratégie globale vs locale

Au plus haut niveau, des connaissances stratégiques sont employées et consistent en des buts qui doivent être atteints durant la tâche. Ce niveau de connaissances est appelé connaissance de la structure de la tâche ou stratégie globale. L'ordre dans lequel les buts sont atteints est souvent flexible et dépend de la situation. Cependant, chaque but définit seulement quelle conclusion intermédiaire peut être déduite et pas comment la conclusion doit être déduite. Ce type de stratégie se rapproche d'une planification descendante, où les objectifs sont fixés avant que les moyens pour les atteindre soient mis en oeuvre. La connaissance de la manière dont une tâche doit être menée est appelée stratégie locale et peut comprendre d'autres procédures dans un ordre fixe ou consister en une séquence de pas flexible. La stratégie locale appliquée à une sous-

tâche sélectionne à son tour la connaissance du domaine nécessaire pour atteindre le but de la tâche (Shaafstal 1993). Pour Reed et Johnson (1993), la stratégie globale consiste en une démarche dans laquelle une erreur est perçue, guide l'extraction de symptômes et génère des tests. Les stratégies locales permettent d'effectuer plusieurs types de tests. Elles comparent la valeur d'un composant à la valeur correcte, réduisent le nombre d'éléments à prendre en compte, analysent l'état d'un composant quand l'erreur se produit et déterminent un point de départ quand aucune information n'est disponible.

1.6.8.3 Stratégies séquentielles

La conception la plus classique d'une stratégie de diagnostic considère celle-ci comme un raisonnement hypothético-déductif et accorde une place centrale à la formulation et au test d'hypothèses. L'accent est mis sur le processus de raisonnement. Dans le cas d'une décision entre plusieurs pannes alternatives, Todd et Bensabat (1994) distinguent deux stratégies. La première est une différence additionnelle. Cette stratégie est basée sur la comparaison des attributs de deux alternatives. L'alternative préférée est retenue, tandis que l'autre est rejetée. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'il ne reste qu'une seule alternative. La seconde stratégie est une élimination par les aspects. Cette stratégie est basée sur une comparaison des attributs d'une alternative à un seuil. Une alternative qui n'atteindrait pas le seuil pour un de ses attributs est éliminée. Ces deux stratégies diffèrent (la différence additionnelle serait plus coûteuse qu'une élimination par les aspects) en termes de volume d'information traité lors du processus de décision et dans le nombre d'opérations appliquées à chaque unité d'information. Les auteurs insistent sur le coût de la stratégie. Des modèles de la prise de décision suggèrent que l'effort est la clé pour expliquer le comportement de prise de décision. Le sujet poursuivrait la stratégie qui demande le moins d'effort et qui donnera une solution acceptable.

Pour Liu (1991), il existe deux procédures de calcul successives impliquées dans l'identification des pannes à partir des symptômes. La première procédure consiste à formuler des hypothèses de panne à partir des symptômes. La question est alors : Comment raisonner avec l'information disponible pour décider quelle partie du système, quand elle est supposée en panne, explique les symptômes ? Il peut y avoir plusieurs explications concurrentes. Il faut donc déterminer toutes les hypothèses de panne. La seconde procédure consiste ensuite à tester les hypothèses formulées et à décider du bon diagnostic. Cette opération revient à tester la cohérence entre les hypothèses de panne, la description du système et les symptômes observés.

Les conceptions qu'on vient de voir ne tiennent pas du fait qu'il peut exister une combinaison de dysfonctionnements dans un processus continu. Dans ce cas, la stratégie

optimale consiste à hiérarchiser les objectifs à atteindre pour résoudre les incidents en entravant le moins possible le déroulement du processus sous contrôle. Kersholt, Passenier, Houttuin et Schuffel (1996) ont étudié ce type de situation de prise de décision dans une tâche de supervision simulée d'un poste de commande d'un navire marchand. Il semble que les opérateurs mettent en œuvre une stratégie plutôt séquentielle dans laquelle les incidents sont traités les uns après les autres. Ce comportement pourrait être dû à une charge de travail importante puisque la tâche de contrôle était négligée par les sujets. En marge de ces données, les auteurs n'ont pu mettre à jour un effet de la fréquence des pannes sur la stratégie des sujets. Cette absence d'effet est expliquée par les chercheurs en termes de temps d'entraînement trop court. Cela nous permet de revenir sur deux points. D'une part, l'effet de fréquence est lié à l'expérience. On a eu l'occasion de s'en convaincre dans les chapitres précédents. D'autre part, les expériences simulées nécessitent de la part des sujets une acquisition de compétences si on veut mettre en évidence des effets de fréquence. L'utilisation de sujets expérimentaux naïfs pose le problème de la construction de l'expertise, du temps alloué à cette construction et de la compétence éventuellement acquise si cette construction n'a pas lieu. Ces restrictions peuvent être contournées (même si d'autres peuvent apparaître) en utilisant des sujets qui possèdent déjà une expertise sur un dispositif naturel.

1.6.8.4 La représentation dans la stratégie

Dans une de ses expériences, Sanderson (1990) (Cf. Figure 7, p. 65) demande à des sujets de trouver, en le manipulant, la structure d'un réseau causal dans lequel existe une panne. Les sujets formulent une hypothèse à propos de l'existence d'un lien. Ils imaginent ensuite ce qui se passerait si ce lien existait et comparent l'état imaginé à l'état réel. Si la comparaison valide l'hypothèse, alors celle-ci est intégrée au modèle mental que le sujet se construit du réseau. Dans le même esprit que Sanderson, d'autres auteurs (Schauble, Glaser, Raghavan & Reiner, 1992) ont demandé à des sujets d'identifier les composants invisibles d'un circuit électrique simple à l'aide de câbles et d'ampoules. De cette expérience ressortent deux types de stratégies : une stratégie de gestion des contraintes qui pèsent sur la mémoire et d'autre part une stratégie de génération et d'interprétation de preuve. Les auteurs affirment que la stratégie concernant la preuve est directement liée au modèle causal que le sujet a construit. La représentation de la tâche et plus particulièrement les liens que le sujet infère entre les composants du système jouent un rôle prépondérant dans cette tâche.

Les experts ont des connaissances structurales (qui décrivent comment les composants sont reliés entre eux), des connaissances de la panne (qui décrivent comment survient cette panne

et comment la réparer) et des connaissances fonctionnelles (qui décrivent les contraintes entre les inputs et les outputs d'un composant quand celui-ci fonctionne correctement). La performance experte reposerait sur un modèle de la panne qui contient uniquement les informations nécessaires (Reed & Johnson, 1993). Les connaissances qui participent à la construction de la représentation doivent être multiples afin de tenir compte de différents niveaux d'abstraction du système et des différents types de relations existant dans ce système. Ces connaissances activées doivent également être économiques. Toutes les connaissances nécessaires au traitement de la panne doivent être activées et uniquement celles-ci. Cette conception économe de la représentation est celle défendue par Ochanine (1978) et Rabardel (1995) (Cf. § 1.4.8 L'heuristique de fréquence et le principe d'économie).

1.6.8.5 Flexibilité des stratégies

Les stratégies ne sont pas figées. Elles peuvent subir des transformations (Rasmussen, 1993a), des modifications dont le but est de les adapter à une situation particulière. Cela peut être un changement dans la nature du problème ou une modification environnementale. Byrne et Handley (1992) abordent la question des stratégies sous l'angle modulaire. Celles-ci pourraient être composées de plusieurs stratégies préexistantes, en assemblant les modules pour un but nouveau. Un changement dans la façon de traiter une situation peut avoir une justification cognitive. Pour Spérandio (1987), les changements de mode opératoire peuvent être une forme de régulation de l'activité, répondant à la nécessité de maintenir la charge globale à un niveau inférieur à la capacité limite afin d'éviter une dégradation de la performance.

Schraagen (1993) a demandé de concevoir des plans expérimentaux à des sujets novices et experts, appartenant ou non à un domaine donné (la recherche sur le goût). Il note deux grandes classes de stratégies. La première classe est une stratégie de contrôle par approfondissement progressif qui consiste à passer plusieurs fois sur le même problème, en acquérant à chaque passage de nouvelles informations. La seconde classe concerne une stratégie heuristique de simulation mentale qui consiste, pour les experts, à concevoir les paradigmes comme des scénarios. Lorsque le sujet essaie de déterminer un détail, il imagine à quoi ressemblera l'expérience. Les experts disposeraient de stratégies de niveaux différents qui s'apparentent au raisonnement de l'expert du domaine. Ceci permet à l'expert extra-domaine d'aborder le problème de manière aussi structurée que l'expert du domaine, même si les solutions proposées sont plus pauvres.

1.6.9 Des modèles de diagnostic automatique

Selon Halpern (1990), il reste un bond à franchir entre les données dont on dispose et un modèle capable d'expliquer la nature des limites de la cognition humaine. Pour cet auteur, les modèles distribués sont les plus attrayants même si les données empiriques ne donnent pas encore de support à un modèle multi-process. Pour d'autres auteurs (Decortis & Cacciabue, manuscrit), le problème de la représentation du fonctionnement cognitif humain ne se pose pas puisqu'un modèle cognitif ne tente pas d'être une réplique fidèle du comportement d'un opérateur idéal. Il ne prétend pas expliquer l'ensemble des phénomènes au problème posé, mais seulement décrire et peut-être expliquer certains de ses aspects essentiels. Cependant, la modélisation et la simulation des performances de diagnostic dans le travail réel doivent tenir compte des caractéristiques cognitives humaines et prendre en compte un répertoire de stratégies possibles (Rasmussen, 1993a). De ce point de vue, construire un modèle peut être plus utile que le modèle lui-même, car il centre la recherche sur les entrées, les sorties, les processus et les paramètres à définir (Decortis, 1993).

On relève différentes classes de modèles. Les modèles conceptuels rendent compte des capacités de compréhension humaine, reflétant les interactions des objets du monde extérieur. Les modèles qualitatifs peuvent prédire l'ordre des événements et la direction des changements. Les modèles quantitatifs donnent des prédictions numériques (Far & Nakamichi, 1993). Il existe une multitude de modèles susceptibles de représenter l'activité de diagnostic. La question n'est pas de savoir quel modèle utiliser exclusivement, mais quel type de modèle ou de connaissance du domaine est approprié dans certaines étapes du diagnostic. D'une façon générale, la représentation multi-niveaux d'un système sur les différents degrés d'abstraction présente une structure hiérarchique. Les plus hauts niveaux décrivent des fonctions indépendamment de la réalisation physique. Sur les niveaux les plus bas, le modèle correspond à une description statique de tous les composants et les relations entre ces composants (Schaafstal, 1993).

Le renforcement des effets des interactions homme-machine sur le comportement d'un système est dû au développement technologique d'appareillages mécaniques et électroniques, au rôle assigné à l'opérateur dans la boucle de contrôle et à la complexité du système sous contrôle (Cacciabue & Kjaer-Hansen, 1993). Pour Yoon et Hammer (1988), le diagnostic de panne est une tâche dans laquelle l'homme est bien meilleur que la machine. Améliorer ou assister la performance humaine dans le diagnostic restera la façon la plus efficace d'augmenter la performance du système mais l'automatisation doit se faire en connaissance de certains points. Elle contient des sources d'erreur (si ce n'était pas le cas, l'opérateur ne serait pas indispensable). Elle doit être initialisée par un opérateur et cela peut être une source de problèmes. Dans de nombreux cas, le diagnostic n'est qu'un sous-but du système qui peut entrer en conflit avec

d'autres sous-buts (la sécurité, par exemple). Pour ces auteurs, l'homme et la machine sont plus capables de trouver une solution en coopération que seuls et l'interaction peut prendre plusieurs formes. Elle peut être dirigée par l'homme, qui assigne des tâches à la machine. Elle peut être suggérée par l'homme, qui impose des contraintes de fonctionnement à la machine ou être indépendante : L'homme et la machine traitent des problèmes séparément. Enfin, elle peut être suggérée voire dirigée par la machine.

1.6.9.1 Les systèmes experts

Pour un système expert, le diagnostic peut se définir comme une sélection de solutions dans un ensemble d'alternatives pour un problème décrit par des observations (Puppe, 1998). L'automatisation du diagnostic est un sujet de recherche important dans la mesure où elle constitue l'application majeure des systèmes experts (Milne, 1987), en médecine notamment (Clark, Fox, Glowinski & O'Neil, 1990). Les systèmes experts tentent de localiser les causes de différences constatées entre l'état présent du système et l'état attendu. Le système expert dispose des sorties et des actions. Il doit déterminer l'état du système qui produit les sorties (Mozetic, 1991). Le principe de détection détermine s'il existe une déviation de ce qui est attendu. La génération d'hypothèses génère ensuite les causes possibles en prenant en compte les observations de normalité. Enfin la discrimination d'hypothèses trie les hypothèses sur la base d'observations additionnelles (Benjamins & Aben, 1997).

Soit un système avec inputs et outputs distincts. Les inputs peuvent être des commandes contrôlant le système ou un ensemble de conditions préexistantes. Les outputs correspondent aux mesures des capteurs ou aux actions prescrites. Le système expert "classique" applique des règles [situation-action] qui recherchent des symptômes mesurés qui puissent indiquer des classes de pannes connues :

$$\{\text{outputs}\} \rightarrow \text{état du système.}$$

Scarl, Jamieson et Delaune (1987) opposent à cette conception un diagnostic basé sur un modèle du type :

$$\{\text{inputs}\} \rightarrow \text{état attendu du système}$$

$$\text{état attendu du système} \rightarrow \{\text{outputs attendus}\}$$

$$\{\text{outputs attendus}\} - \{\text{outputs réels}\} \rightarrow \text{état du système.}$$

La différence essentielle entre les deux approches réside dans la comparaison entre les sorties observées et les sorties attendues, ce que permet le diagnostic basé sur un modèle.

Puisqu'un système de diagnostic raisonne directement à partir de la structure et de la fonction d'une installation, il s'ensuit une structure de contrôle simple. Elle commence en haut de la structure hiérarchique et tente de trouver des outputs qui violent les attentes. Après avoir détecté les violations, le système utilise des descriptions structurales pour trouver, dans le niveau hiérarchique inférieur, un ensemble de composants susceptibles d'être responsables. (Chen & Srihari, 1994). Le GDE (*General Diagnosis Engine*) de De Kleer et Williams (1987) travaille à partir des mêmes principes. A partir des différences constatées entre les productions du système et ce que prédit le modèle de son fonctionnement normal, des conflits¹³ sont recherchés. Etant donné le risque que représente l'explosion combinatoire, les conflits recherchés sont dits minimaux, c'est à dire du plus bas niveau hiérarchique possible. La génération de candidats à la panne utilise l'ensemble des conflits minimaux pour construire un ensemble de candidats minimaux.

Il existe une conception plus abstraite où la connaissance fondamentale d'un système est considérée comme un ensemble de contraintes (Ohlsson, 1996) que l'inférence essaie de satisfaire (Liu, 1991). La génération de candidats à une panne peut se faire en utilisant une technique appelée la suspension de contrainte (Davis, 1984). En fonction des symptômes d'un dysfonctionnement, le système expert établit un ensemble de candidats, c'est à dire des composants qui peuvent être responsables du dysfonctionnement. Le comportement attendu d'un système est modélisé en termes de réseau de contraintes interconnectées où chaque contrainte représente le comportement d'un des composants. Si le système fonctionne mal, alors les outputs prédits par le réseau de contraintes ne correspondront pas aux outputs réels. La suspension de contrainte pose la question : "Y a-t-il une contrainte (un comportement de composant) qui puisse être ôtée en laissant le système dans un état consistant ?".

Il existe une règle élémentaire en matière de modélisation qui veut que plus on s'approche d'un niveau de détail fin dans la description d'un système, plus la complexité est écrasante. Bien que tous les systèmes réels aient cette propriété, certains systèmes présentent cette complexité même aux niveaux d'abstraction les plus élevés. Dans ce cas, la nature et l'ordre des tests à appliquer sur le système deviennent cruciaux (Pattipati & Alexandridis, 1990). On peut alors s'appuyer sur plus d'un type d'organisation des connaissances. Un schème d'organisation des connaissances composé d'une variété de modèles, chacun traitant une partie du problème, est la manière la plus efficace de traiter un problème complexe à différents niveaux d'abstraction (Fishwick, Narayanan, Sticklen & Bonarini, 1994).

¹³ Dans la terminologie de De Kleer et Williams, un conflit peut être entendu comme une panne et un candidat peut être entendu comme un composant.

Les systèmes experts doivent refléter le monde physique et psychologique des experts et non l'inverse. Ils doivent se satisfaire d'indices incomplets (Puppe, 1998) et être aussi souples que les experts qu'ils doivent simuler (Schanteau, 1992). Ce type d'approche, qu'on pourrait qualifier de mimétique, est celle adoptée par Xiang et Srihari (1986). Ces auteurs proposent un processus de diagnostic qui utilise plusieurs types de connaissances et qui se décompose en deux niveaux. Le premier niveau utilise des connaissances empiriques de la panne. Le modèle intègre les associations symptômes-causes les plus fréquentes. Une fois ces associations épuisées et si la cause de la panne n'est pas trouvée, le diagnostic se poursuit sur la base d'un modèle du système. Le processus de raisonnement est alors qualitatif (il désigne des hypothèses alternatives, des zones de panne) et quantitatif (il calcule les possibilités de panne de chaque composant de la zone). Il se base sur les propriétés des composants et leurs relations dans le système. Lorsque le résultat est trouvé, il est incorporé à la base de connaissances empiriques. Selon les auteurs, cette approche multi-niveaux trouve sa justification dans le fait que d'une part, deux types de connaissances (empiriques et du modèle) sont nécessaires pour faire aboutir un diagnostic et que d'autre part, la flexibilité d'un modèle de diagnostic implique qu'on utilise plusieurs types de connaissances. La conception de Xiang et Srihari semble reposer sur les processus de raisonnement employés par les opérateurs humains. Ceux-ci commencent le diagnostic par la consultation d'un répertoire de liens causaux reliant directement des symptômes à des pannes. Une fois ces liens épuisés, le diagnostic abandonne en partie le niveau des règles et repose sur une analyse plus profonde du système. Ram, Narayanan et Cox (1995) utilisent la même approche que Xiang et Srihari. Leur modèle de diagnostic utilise des associations, présentées comme des règles simples qui font correspondre un symptôme à un diagnostic. Ces associations permettent, selon les auteurs, un diagnostic rapide et précis. Lorsque les associations ne sont pas disponibles, le modèle utilise des heuristiques, présentées comme des règles standard qui déterminent une série d'opérations à effectuer indépendamment du contexte. Le reste du modèle effectue des actions de collecte d'information, des extractions de symptômes et des réparations. Le modèle a la possibilité d'intégrer des nouvelles associations de manière autonome ou de manière supervisée (par un opérateur humain). L'idée est de permettre au modèle de sélectionner et d'appliquer une stratégie d'apprentissage afin d'augmenter ses chances de faire un diagnostic correct dans des conditions similaires.

1.6.9.2 Les modèles connexionnistes

Selon Varela (1989), les modèles connexionnistes sont beaucoup plus proches des systèmes biologiques que l'intelligence artificielle (IA) ce qui permet l'intégration relative, jusqu'ici

impensable, des recherches effectuées en IA et en neurosciences. Pour l'auteur, ces modèles sont suffisamment généraux pour être appliqués presque tels quels à divers domaines comme la vision ou la reconnaissance de la parole. Cependant, l'absence de calcul symbolique et l'omniprésence d'un mécanisme d'activation comme principe de fonctionnement peut faire penser que les liens entrée-sortie qui sont formalisés dans les réseaux connexionnistes sont en quelque sorte une *"nouvelle expression des théories béhavioristes en psychologie cognitive"* (Bastien, 1992).

La question de la proximité des réseaux connexionnistes par rapport aux neurones humides n'est plus au coeur des débats. Pour ce qui est des réseaux à rétro-propagation, la notion d'auto-modification de l'algorithme a certes une analogie avec la capacité des neurones à modifier leurs connexions entre eux. C'est d'ailleurs une des différences fondamentales avec un système expert. Cependant, cette analogie repose plus sur la représentation graphique que l'on propose des réseaux (des couches de cellules reliées) que sur le fonctionnement réel du programme informatique qui les génère (une fonction). Pour Abdi (1994), l'idée qui préside dans la réalisation de réseaux de neurones est de s'inspirer des propriétés du cerveau pour construire des systèmes capables de résoudre des problèmes que les humains savent résoudre, ce qui n'est pas du tout évident pour une machine (par exemple reconnaître une écriture ou un visage). Ils peuvent aussi servir à tester des hypothèses à propos de phénomènes cognitifs. Mais cette volonté d'établir un parallèle entre le fonctionnement du cerveau et le fonctionnement d'un réseau s'arrête au principe d'auto-modification. L'analogie est fonctionnelle et se situe à un niveau d'abstraction très élevé, même si pour Tiberghien (1996), le niveau subsymbolique du connexionnisme peut servir d'interface entre les niveaux neurologique et cognitif.

Les réseaux connexionnistes peuvent montrer, dans certains cas, des résultats supérieurs à ceux des autres systèmes de décision. Kim, Weistroffer et Redmond (1993) ont montré qu'un réseau connexionniste était plus précis dans une tâche de classification qu'un système expert ou que des outils statistiques classiques. Les auteurs commentent ce résultat en précisant que les données de la tâche considérée (la classification d'actions boursières en fonction de leur risque de non-paiement) sont incomplètes et bruitées. L'avantage des réseaux, dans cette situation, est leur plus faible exigence quant à la qualité des données. C'est probablement une des caractéristiques universelles des réseaux connexionnistes qui peuvent "extraire" les valeurs pertinentes des données à traiter (comme dans le cas de la reconnaissance de caractères, par exemple). Un autre avantage de certains réseaux connexionnistes sur les modèles de l'IA repose sur leur capacité à éviter l'explosion combinatoire. Un modèle d'IA de diagnostic (par exemple) contient des liens causaux qui relient des effets à des causes, avec des probabilités qui représentent les forces de ces liens. La solution à un problème est une hypothèse consistant en zéro dysfonctionnement ayant la plus grande probabilité. L'IA souffre de l'explosion combinatoire dans la résolution de tels

problèmes. Cela est dû au fait qu'elle doit comparer les probabilités futures de toutes les combinaisons de dysfonctionnements possibles. Dans un réseau, une représentation locale est utilisée. Les noeuds, représentant les concepts, sont reliés par des liens dont les poids représentent les forces d'association entre les noeuds. Ces liens sont également considérés comme des canaux pour envoyer de l'information entre les noeuds. A tout moment, chaque noeud reçoit des informations à propos des niveaux d'activation des noeuds voisins et utilise ces informations pour calculer son propre niveau d'activation. Au travers de ce processus d'extension d'activation, le réseau arrive à un équilibre qui représente la solution au problème (Peng & Reggia, 1989). On dit que le réseau a appris.

Plusieurs classes d'apprentissage existent pour les réseaux connexionnistes. La première est l'apprentissage par corrélation. On présente au système une suite d'exemples qui le conditionnent pour les prochaines occurrences. La seconde méthode est l'apprentissage par imitation, c'est à dire en utilisant un modèle qui sert de professeur actif (Varela, 1989). Cette stratégie est issue de celle que Rosenblatt (1962, cité par Varela) proposait pour son *perceptron*, appelée aujourd'hui rétro-propagation. Cette méthode demande que les liens entre les neurones internes du réseau (appelés unités cachées) soient établis de façon à minimiser les différences entre les réactions du réseau et le résultat qu'on attend. Citons enfin les mémoires associatives qui permettent de reconstituer une information lorsque seuls certains éléments de celle-ci sont disponibles (Abdi, 1994).

1.6.10 Quelle conception du diagnostic pour notre recherche ?

Nous voici rendus à l'extrémité de notre exposé théorique puisque nous venons d'aborder les concepts les plus directement utilisables pour notre recherche. Des différentes formes de diagnostic exposées ici, il faut en retenir une comme plutôt représentative des expériences dont il va maintenant être question. Il s'agit du dépannage ou, pour reprendre notre terminologie, de la correction de déviation. C'est ce type de diagnostic que la partie expérimentale met en jeu. On va préférer ici le diagnostic automatisé à la recherche logique à base de chaînage. Encore une fois, le délaissement d'une approche au profit de l'autre n'est pas totalement exclusif. La recherche de panne par appariement [symptômes-causes] peut nécessiter le recours, à un niveau local, d'une stratégie séquentielle et topographique. Cependant, l'approche qui sera étudiée ici repose clairement sur les associations. Le concept de schéma nous sera très utile car il fournit un support théorique à une formalisation. Les ouvertures de la thèse mettront en jeu les autres cas de figure

du diagnostic dans des formes souvent combinées. Mais n'anticipons pas trop et intéressons-nous maintenant aux expériences et à la question que nous allons étudier.

1.7 HYPOTHESE THEORIQUE

On sait que la résolution de problème experte est régie par un principe d'économie. On sait aussi que les experts ont développé des structures de connaissances qui leur permettent d'identifier les causes d'un dysfonctionnement sans recourir à l'inférence, au moyen d'un raisonnement automatisé. Il peut s'agir, par exemple, d'un schéma ou d'une association symptôme-cause. On sait enfin que ces structures de connaissances peuvent être mises en oeuvre sur la base de critères approximatifs.

La conception classique de l'expertise repose sur une capacité à mobiliser des connaissances adaptées à la tâche en cours et à catégoriser efficacement les problèmes. Pour Spérandio (1987), par exemple, les experts résolvent les problèmes plus vite et mieux car ils ont un plus grand répertoire de procédures et de solutions. Ils définiraient mieux l'espace problème grâce à une sélection plus efficace des données initiales pertinentes. Les schémas inappropriés seraient plus vite écartés et ils hésiteraient moins longtemps que les novices à redéfinir le problème, c'est à dire à le poser différemment. C'est cette conception que l'hypothèse défendue ici met en question. Le raisonnement expert ne serait pas caractérisé par la souplesse mais plutôt par une certaine rigidité. Les nombreux problèmes que l'expert en dépannage a rencontrés au travers de son expérience ont contribué à figer des procédures d'action du fait de l'apprentissage empirique des fréquences de co-occurrences [symptômes-panne]. L'expert peut alors être soumis à des biais, peut commettre des erreurs et activer des connaissances qui ne sont pas toujours pertinentes. Les recherches menées dans le champ de la résolution de problème tendent à montrer que les connaissances de l'expert sont spécialisées et que son mode de résolution de problème est en grande partie automatisé. Cette spécialisation pourrait être à l'origine de la nature de son raisonnement. Elle pourrait impliquer qu'un mode de résolution de problème automatisé soit mis en œuvre et que les erreurs produites dépendent principalement de ce mode.

L'expérience modifie l'organisation des connaissances. Lors des confrontations répétées de l'expert avec le problème, un plan est élaboré. Il est récupéré sur la base d'activateurs chaque fois qu'une situation s'approche des conditions optimales de mise en oeuvre. C'est le principe d'économie qui régit cette conduite. La récupération d'informations contenues en mémoire est plus rapide et moins coûteuse que l'inférence. C'est pourquoi le sujet expert, quand cela est possible, récupère plutôt qu'il infère. Dans une situation où des traits de surface incompatibles avec la cause de la panne ont activé une procédure, la stratégie mise en oeuvre est inadaptée. A la suite de Reason (1990), on peut affirmer que les indices situationnels déclencheurs de procédures

automatisées sont à l'origine des erreurs d'expert. Ces indices peuvent être approximatifs et activer un schéma non pertinent à la tâche en cours. On tentera de montrer que les erreurs des experts relèvent d'une association automatisée et qu'il existe un biais lorsque les indices situationnels ne sont pas ceux d'une mise en œuvre optimale de ce mode. Dans la mesure où le raisonnement novice repose en grande partie sur le niveau des connaissances, on prédit que ces sujets ne seront pas soumis à ce biais. On s'attend donc à ce que les novices montrent des comportements de diagnostic plus efficaces dans certains compartiments de l'activité.

On défendra également l'idée que l'erreur d'expert n'est pas dépendante des données situationnelles. On s'attend à déceler des similitudes dans les stratégies développées et dans les erreurs commises par des opérateurs exerçant dans des domaines différents (mécanique et électronique).

2. EXPERIMENTATION

2.1 PRESENTATION DES EXPERIENCES

L'hypothèse théorique présentée plus haut est testée dans les domaines de la mécanique et de l'électronique. Ces secteurs d'activité sont fortement liés dans certains secteurs industriels (l'automobile, par exemple), ce qui confère une certaine validité industrielle à leur étude conjointe. De plus, ce sont des disciplines que l'on peut qualifier de premières, c'est à dire que l'une ou l'autre (ou les deux) est présente dans de très nombreux dispositifs industriels (machines-outils, chaînes de production, transports, etc.) ou domestiques (micro-informatique, téléphonie, etc.).

L'approche générale des expériences et de l'ensemble de la thèse consiste en l'étude expérimentale d'un comportement de terrain. Cette recherche adopte des plans expérimentaux simples car elle vise la mise à jour de comportements généraux, à l'échelle d'une stratégie. Les tâches sont considérées comme naturelles, c'est à dire que ce sont celles que traitent les opérateurs dans leur travail. L'aspect extérieur du dispositif et les outils utilisés sont ceux du travail réel. L'objectif de la méthodologie mise en place dans les expériences est de permettre l'émergence de comportements naturels dans une tâche naturelle.

Le raisonnement de diagnostic est étudié ici sur des cas de panne rares qui seront décrites en détail dans la présentation de chaque expérience. La caractéristique commune des pannes étudiées est la ressemblance des symptômes à ceux d'une autre panne. En d'autres termes, l'opérateur est dans une situation dont les traits de surface lui sont familiers mais qu'il a jamais ou rarement rencontrée auparavant. La justification de l'étude de ce type de panne se trouve dans la littérature traitant du diagnostic et de l'expertise. Les nombreuses recherches entreprises dans ces deux domaines montrent clairement que les experts sont très efficaces dans des configurations de travail familières. Les résultats obtenus dans ce type de situation mettent à jour une économie de ressources dans le raisonnement, une grande rapidité ainsi qu'une grande fiabilité. Cependant, l'étude de situations favorisant l'apparition d'erreurs reste très minoritaire. L'objectif des expériences présentées ici est d'étudier l'expertise dans des configurations rares traitées comme des configurations fréquentes dans un domaine où une compétence est déjà largement développée. On verra que lorsque des symptômes fréquents sont associés à une panne rare, la compétence de l'expert repose largement sur des traits de surface et conduit à des erreurs.

Les 4 expériences qui suivent se décomposent en deux expériences en électronique et deux expériences en mécanique. La première expérience d'électronique a été conduite dans le

cadre du DEA et a fait l'objet d'une publication (Besnard & Bastien-Toniazzo, 1999). Elle teste la problématique et doit être considérée, du fait des effectifs expérimentaux qu'elle met en œuvre, comme une pré-expérience. La question des effectifs des trois autres expériences doit être abordée ici. Les groupes d'experts comptent 8 à 10 sujets. Les groupes de novices en comptent 8 à 9. Les limites inférieures des outils statistiques sont atteintes en ce qui concerne la puissance des effets.

2.2 PRE-EXPERIENCE EN ELECTRONIQUE

2.2.1 Méthode

2.2.1.1 Sujets

Les sujets sont 3 experts et 3 novices en électronique. Les experts sont des opérateurs du Port Autonome de Marseille qui ont entre 19 et 20 ans d'expérience. Les novices sont des élèves de terminale d'un lycée de Marseille qui pratiquent l'électronique depuis la classe de première.

2.2.1.2 Matériel

2.2.1.2.1 *Outils*

Pour effectuer son diagnostic, le sujet dispose d'un multimètre et d'un oscilloscope. La tâche est représentée schématiquement sur deux supports : un schéma d'implantation et un schéma théorique (Cf. Figure 13 et Figure 14).

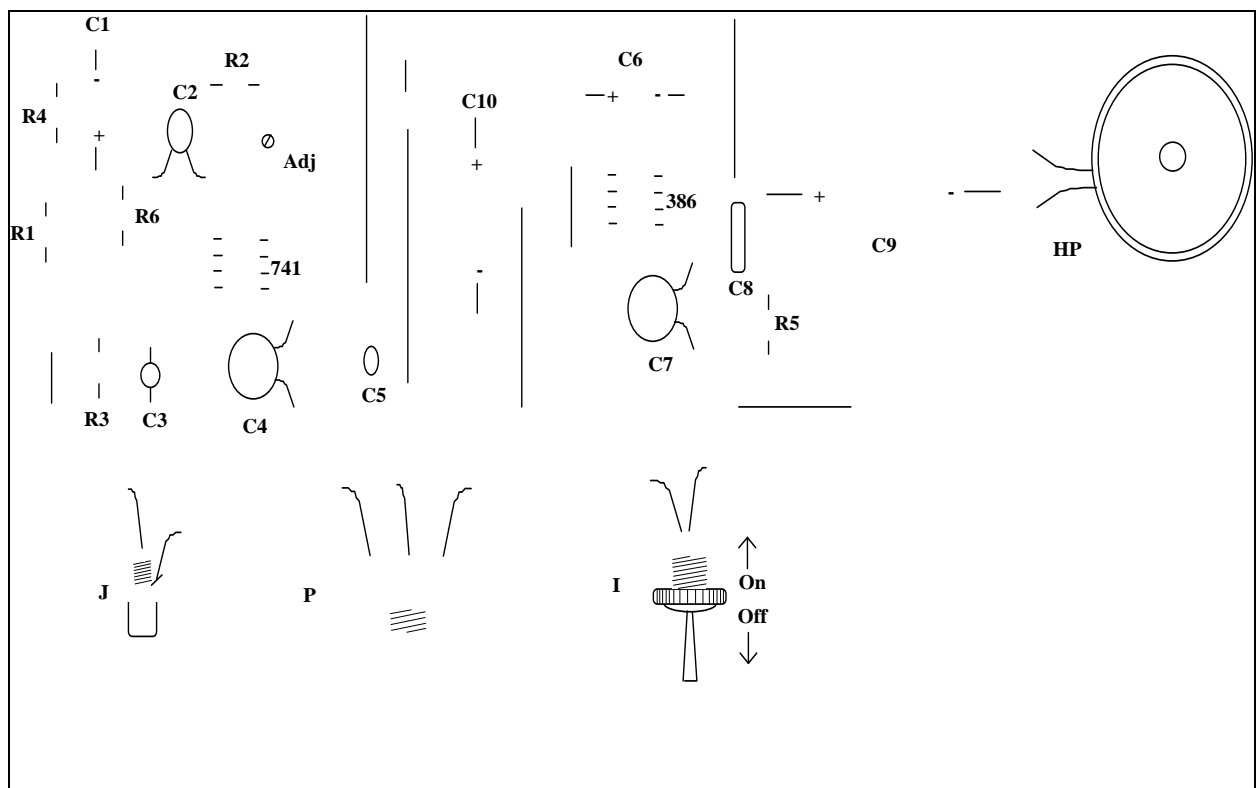


Figure 13 : Schéma d'implantation

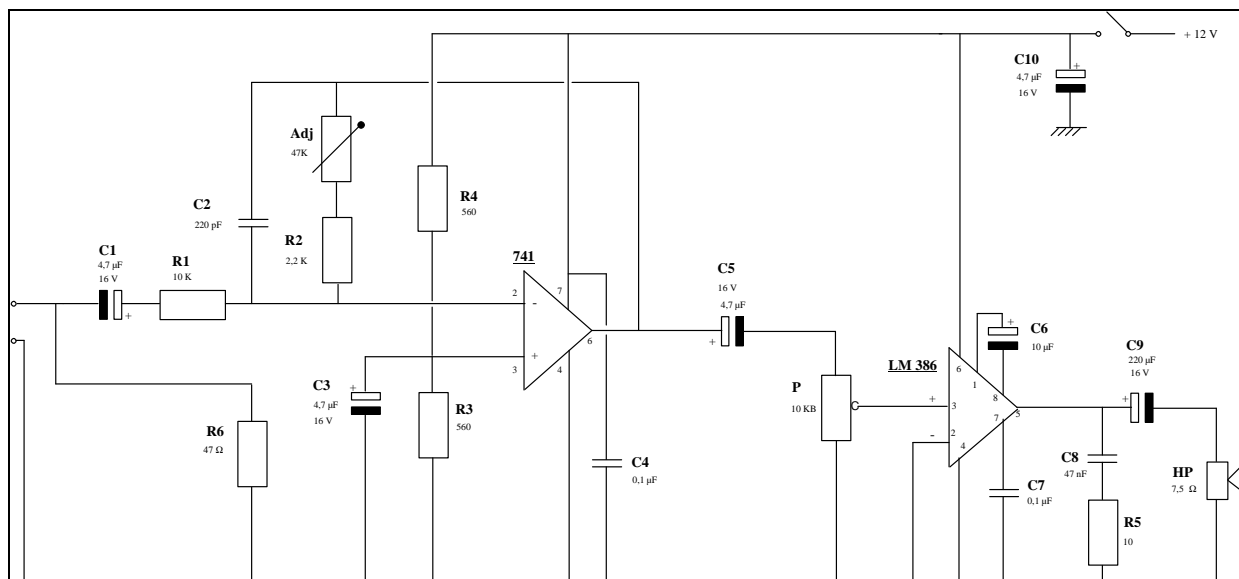


Figure 14 : Schéma théorique

Les schémas théorique et d'implantation figurent en taille réelle en Annexe 7.1.

2.2.1.2.2 Dispositif

Le circuit est un amplificateur basse fréquence (Cf. Figure 15 ci-dessous)¹⁴.

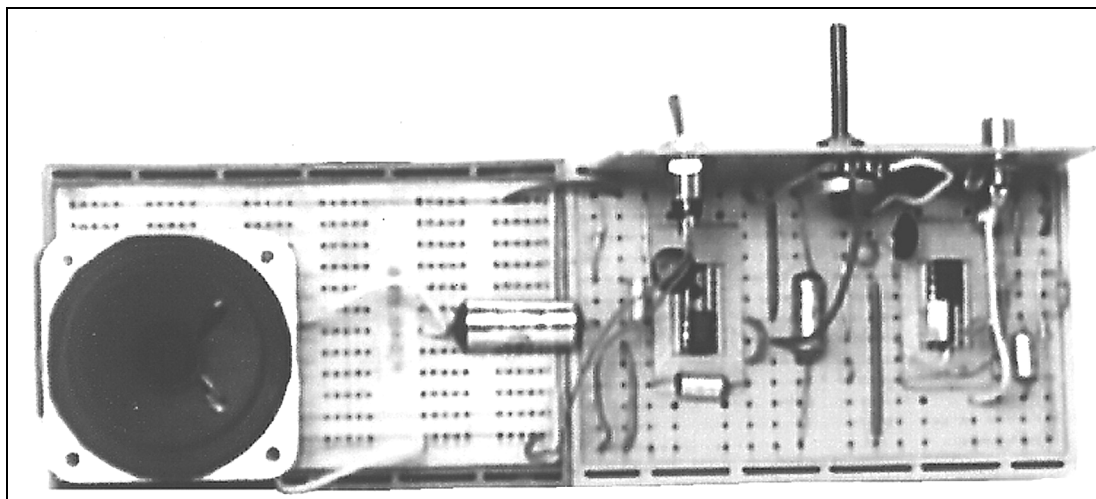


Figure 15 : Dispositif expérimental.

¹⁴

Merci à Jean-Claude Gédin pour la conception du dispositif.

L'assemblage, les schémas et les composants respectent la nomenclature. Les schémas sont conformes au montage. Le support permet au sujet de visualiser les pistes et les connections des composants entre eux.

2.2.1.3 Description de la panne

La panne retenue ressemble à une autre panne dont le diagnostic est rapide : la panne d'un circuit intégré. La panne concerne le condensateur C7. Celui-ci est en court-circuit par un fil soudé invisible¹⁵. Les symptômes produits incitent le sujet à incriminer le circuit intégré (CI 386) auquel le condensateur est relié.

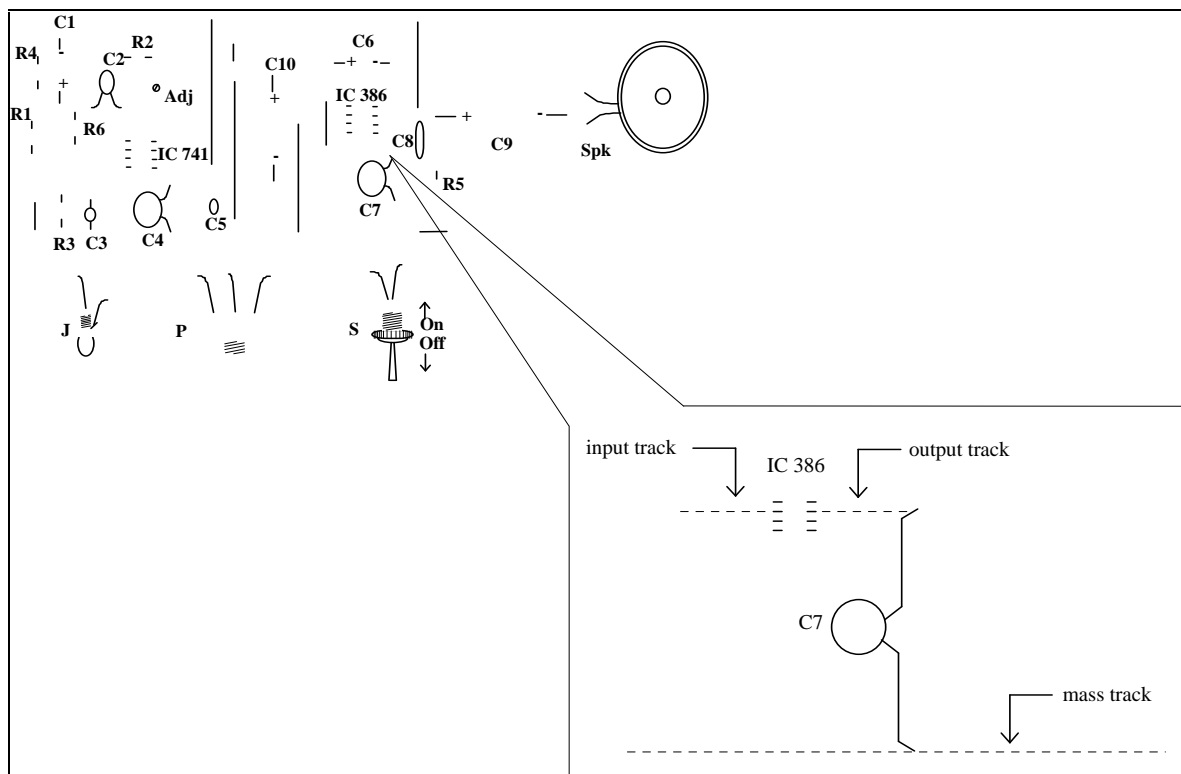


Figure 16 : Détail de la panne

Dans des conditions normales, le CI 386 reçoit le signal sur la broche d'entrée et le restitue par la broche de sortie, comme indiqué sur le schéma de la Figure 16. En condition de panne, la résistance C7 fait passer le signal directement vers la masse. Lorsque le sujet teste ce CI,

¹⁵ Cette panne est artificielle. Il n'a pas été possible de griller ce composant. Cependant, les pré-tests ont montré que les sujets ne soupçonnent pas la présence du fil.

il prend un point de test sur la broche d'entrée, constate la présence d'un signal, puis teste la broche de sortie et constate l'absence de signal.

2.2.1.4 Consignes

L'expérience se déroule dans un laboratoire de mesure. Le sujet est installé à un poste de travail équipé. L'expérience lui est alors présentée.

"Je suis étudiant. Je suis ici dans le cadre de mes études. Je vais vous demander de faire un diagnostic sur ce circuit. Je vous montrerai le problème lorsque j'aurai fini de lire ces consignes. Vous devez savoir que ce que je vais vous demander n'est pas une évaluation de vos compétences. Je veux uniquement recueillir des données sur le dépannage. Vos supérieurs¹⁶ ne seront informés des résultats l'étude que de façon anonyme. Etes-vous d'accord pour participer à ce travail ?"

Si l'opérateur refuse, il est écarté de l'expérience.

Pour trouver ce qui ne va pas, vous disposez d'un multimètre et d'un oscilloscope, du schéma théorique et du schéma d'implantation.

Chaque fois que vous effectuez une opération, une mesure, etc., vous devez me dire le nom du composant tel qu'il est écrit dans les schémas, ce que vous en attendez et ce que vous en déduisez. Même si vous ne déduisez rien, vous devez me le dire. J'ai très peu de connaissances en électronique. Je vous demande donc de parler pendant toute la durée de votre travail, pour que je comprenne ce que vous faites.

Vous ne pouvez toucher les composants qu'avec les instruments de mesure. Si vous avez une intervention à effectuer sur le circuit, vous devez me le demander et c'est moi qui l'effectuerai, selon vos directives.

Vous avez compris les consignes ?

Vous avez des questions ?"

L'expérimentateur répond aux questions éventuelles.

2.2.1.5 Procédure

Le sujet est installé à un poste de travail équipé d'un multimètre et d'un oscilloscope. Ces instruments sont suffisants pour trouver la panne et sont maîtrisés par l'ensemble des sujets.

¹⁶ Pour les novices, ce mot est remplacé par professeurs.

Après la lecture des consignes, le dispositif est mis en marche (en configuration de panne) et le diagnostic commence. Les tests sont notés sur une grille (Cf. annexe 7.2). Le sujet a la possibilité de changer des composants. L'épreuve s'arrête quand le sujet trouve le composant défectueux ou quand il abandonne. Aucun conseil n'est donné au sujet et l'expérience peut s'arrêter sans que la cause de la panne soit découverte.

Lorsque le sujet est silencieux et qu'il n'effectue aucune opération, l'expérimentateur relance la verbalisation.

2.2.1.6 Plan d'expérience

Le plan est $S < E_2 >$ où E est l'expertise.

2.2.1.7 Variables

2.2.1.7.1 *Variable indépendante*

Expertise, à deux modalités (expert *vs* novice).

2.2.1.7.2 *Variables dépendantes*

Les variables ont été retenues pour leur généralité. On remarquera que les CI occupent une part importante. Certaines mesures se doublent d'un pourcentage. Cela permet d'établir des comparaisons plus directes des deux populations.

1/ *Panne trouvée ou non*

2/ *Nombre total d'opérations*

3/ *Nombre moyen de tests du CI 386*

4/ *Pourcentage de tests du CI 386*. C'est la proportion de tests du CI386 par rapport à l'ensemble des opérations.

5/ *Nombre moyen de tests enchaînés du CI 386*. Des tests enchaînés sont des opérations identiques qui se succèdent les unes aux autres sans être insérées dans un split-half¹⁷.

6/ *Nombre moyen de tests avant le 1^{er} test d'un CI*

7/ *Pourcentage de progression avant le 1^{er} test d'un CI*. C'est la proportion de la variable 6 par rapport au nombre total d'opérations.

8/ *Nombre de tests avant le 1er test du CI 386.*

9/ *Pourcentage de progression avant le 1er test du CI386.* C'est la proportion de la variable 8 par rapport au nombre total d'opérations.

2.2.1.8 Prédiction

Dans la mesure où cette première expérience pilote la problématique, la prédiction qui sera faite concernera une orientation attendue plus que des hypothèses précises.

Les CI sont les composants les plus importants du circuit. Dans la majorité des cas, la panne du circuit est due à une panne de ce type de composants. Conformément à l'heuristique de fréquence, on s'attend à ce que le diagnostic expert repose sur les CI et que les erreurs de ces sujets gravitent autour de ces composants. Si l'on en croit Rasmussen et Jensen (1974) l'opérateur expert pourrait rester sous un mode de raisonnement automatique, extraire les mêmes informations et activer le même schéma plusieurs fois de suite sans pouvoir identifier la cause de la panne. On s'attendra donc à ce que les sujets experts commettent cette erreur.

2.2.2 Résultats

Les résultats ont été publiés dans Besnard & Bastien-Toniazzo (1999). La table des données figure en Annexe 7.4.1. Le Tableau 1 résume les données.

Tableau 1 : Table des moyennes

<i>Variables dépendantes</i>	<i>Experts</i>	<i>Novices</i>
Nombre total d'opérations (VD2)	39.33	13
Nombre moyen de tests du CI 386 (VD3)	18.66	2
% de tests du CI386 (VD4)	47%	14%
Nombre moyen de tests enchaînés du CI 386 (VD5)	5,36	0
Nombre moyen de tests avant le 1er test d'un CI (VD6)	1,3	3
% de progression avant le 1 ^{er} test de CI (VD7)	3,3%	23,07%
Nombre moyen de tests avant le 1er test du CI 386 (VD8)	5,6	4,6
% de progression avant le 1 ^{er} test du CI386 (VD9)	14,23%	35,38%

L'analyse est de nature plutôt qualitative. Aucune analyse de variance n'a été conduite dans la mesure où les données ne visent qu'à présenter des tendances.

Un novice n'a pas trouvé la cause de la panne (VD1). Celui-ci a tout de même été inclus dans les dépouillements ultérieurs.

Les résultats vont être séparés en deux groupes à des fins de clarté. Dans un premier temps seront exposés les données brutes. Les données en pourcentages seront présentées ensuite.

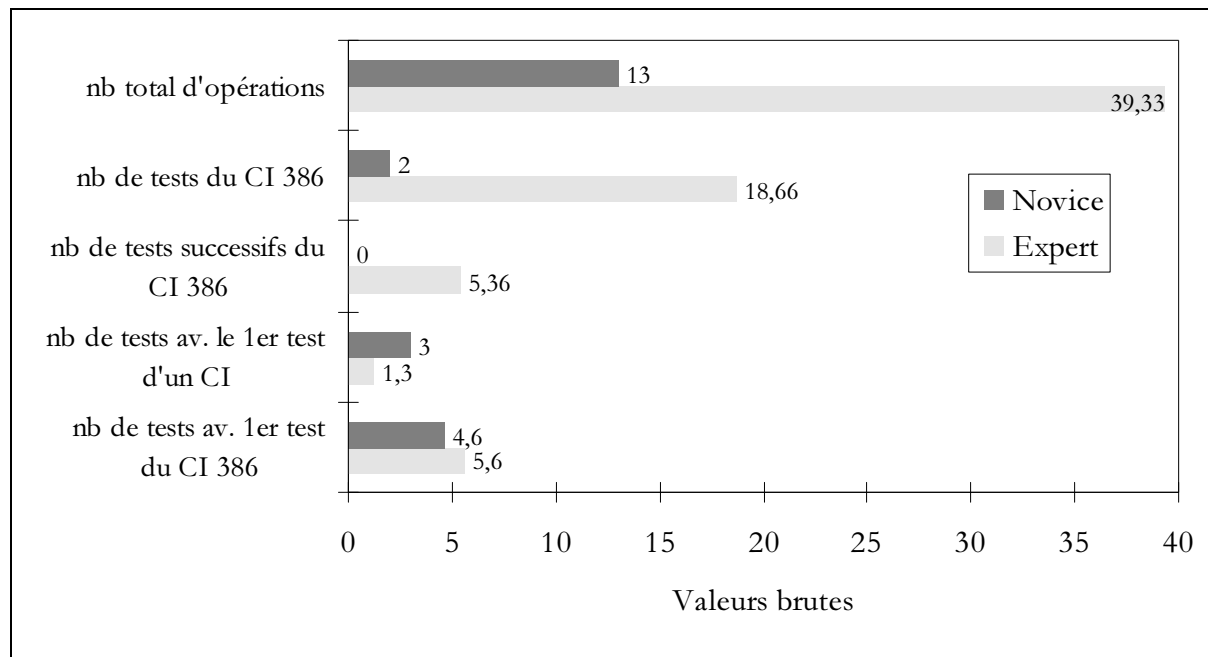


Figure 17 : Représentation graphique des résultats en valeurs brutes

Comme on peut le constater sur la Figure 17, le nombre total d'opérations est 3 fois plus élevé chez les experts que chez les novices (VD2) (experts=39,33 ; novices=13). Ces sujets ont également fait plus de tests du CI 386 (VD3) (experts=18,66 ; novices=2) et ont effectué des tests enchaînés du CI 386 (VD5), contrairement aux novices (experts=5,36 ; novices=0). Les experts testent un CI (VD6) plus tôt que les novices (experts=1,3 ; novices=3) et testent le CI386 (VD8) plus tôt que les novices (experts=5,6 ; novices=4,6).

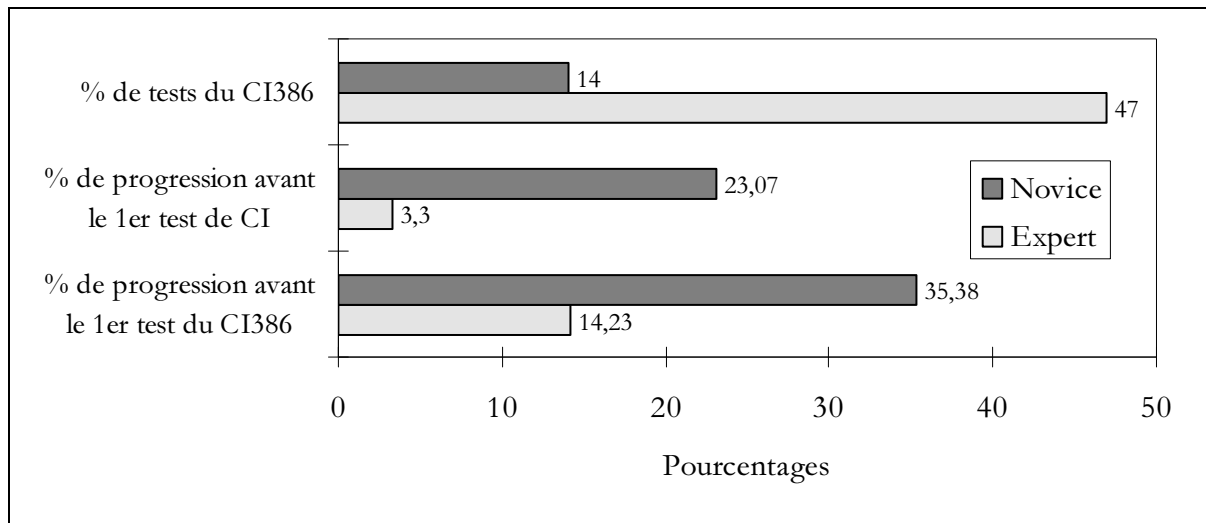


Figure 18 : Représentation graphique des résultats en pourcentages.

Comme le montre la Figure 18, le pourcentage de tests du CI 386 (VD4) indique que les experts ont consacré presque la moitié de leurs opérations à ce seul composant (experts=47% ; novices=14%). Ils testent les CI plus tôt que les novices dans le diagnostic (VD7) (progression des experts=3,3% ; progression des novices=23,07%). On remarque la même tendance à propos du CI 386 (VD9) (progression des experts=14,23% ; progression des novices=35,38%).

2.2.3 Discussion

Dans l'ensemble, les résultats soutiennent l'idée que les experts peuvent montrer des performances dégradées dans certains compartiments du diagnostic. Ils témoignent de performances inférieures à celles des novices sur le nombre total d'opérations (VD2), sur les tests du CI 386 (VD3) et sur le nombre de tests successifs du CI 386 (VD5). Le CI 386 est l'élément clé du diagnostic. Lors de la tentative d'identification de la cause de la panne, c'est le premier composant que l'expert rencontre qui présente un fonctionnement anormal. Il reçoit des entrées mais ne produit pas de sortie. La discussion des résultats gravitera en majeure partie autour des comportements des opérateurs vis-à-vis du CI386.

A la fin du diagnostic, il a été demandé aux sujets de dire ce qu'ils pensaient de la tâche, de manière informelle. Certains experts ont fait remarquer que la panne était difficile à localiser dans la mesure où le composant C7 (un condensateur céramique) est très fiable. Il tombe très rarement en panne. Ils ont expliqué l'importance accordée au CI 386 en arguant que c'est la

différence de probabilité de panne entre le CI et C7 qui est à l'origine de leurs difficultés. De ce point de vue, les difficultés des experts sont à considérer comme la marque d'un comportement normal et non comme la remise en cause de leur compétence. Dans les situations de terrain, une des stratégies des experts consiste, après avoir testé le bloc d'alimentation, à tester les CI du circuit en panne. Cette procédure est en accord avec le principe d'économie. Les tests portent préférentiellement sur les composants actifs, qui provoquent le plus fréquemment les pannes.

Le nombre d'opérations effectuées sur les CI (particulièrement le CI386), que ce soit en valeur brute ou en pourcentage, est plus faible chez les novices que chez les experts. Cette différence peut s'expliquer par la mise en oeuvre ou non d'une heuristique de fréquence. Les experts de cette recherche ont 20 années d'expérience. Ils ont des connaissances empiriques à propos des fréquences de pannes dans les systèmes. Ces dernières supportent une stratégie économique qui vise à incriminer d'abord les CI. Pour les novices, il n'existe pas de composant prioritaire lorsqu'il s'agit d'attribuer la cause de la panne. La première explication des résultats que l'on peut avancer est que le diagnostic repose sur un raisonnement probabiliste : *"le diagnosticien sélectionne la faute¹⁸ qui, dans le passé, s'est montrée la plus susceptible de déclencher les symptômes observés"* (Patrick, 1993, p. 193-194). L'expert mettrait en oeuvre un traitement automatisé de l'information. Le novice adopterait un raisonnement moins automatisé dans lequel la fréquence des occurrences de panne est soit inutilisée, soit inconnue. Le modèle de Rasmussen pose que le raisonnement du novice est une suite d'inférences qui construit des connaissances à propos du problème en cours. En fait, on peut avancer que même le novice essaie de traiter la situation en cours en fonction des expériences antérieures dont il dispose. Il est difficile de montrer qu'une expérience, aussi réduite soit elle, ne participe pas à la résolution d'un problème nouveau. Cependant, si le raisonnement du novice n'est pas totalement inférentiel (ce qui est une conviction majeure ici), il n'est pas pour autant guidé par les mêmes indicateurs que le raisonnement expert.

L'expert passe directement de l'observation des données de l'oscilloscope au remplacement du CI. Le changement de composant est le résultat d'une association automatisée entre un ensemble de symptômes et une cause de panne. C'est un lien de cause à effet que l'expérience a établi au travers d'observations empiriques (Fink & Lusth, 1987) (Cf. Figure 19). Les experts, face à un activateur du type :

[le signal électrique entre dans le CI mais ne sort pas]

déclenchent le remplacement du CI. C'est ce que Amalberti et Hoc (1993) appellent une *"identification sommaire par appariement d'un schéma connu avec les faits observés"* (p. 50-51).

¹⁸

C'est-à-dire la cause de la panne (Chang, Di Cesare & Goldbogen, 1990).

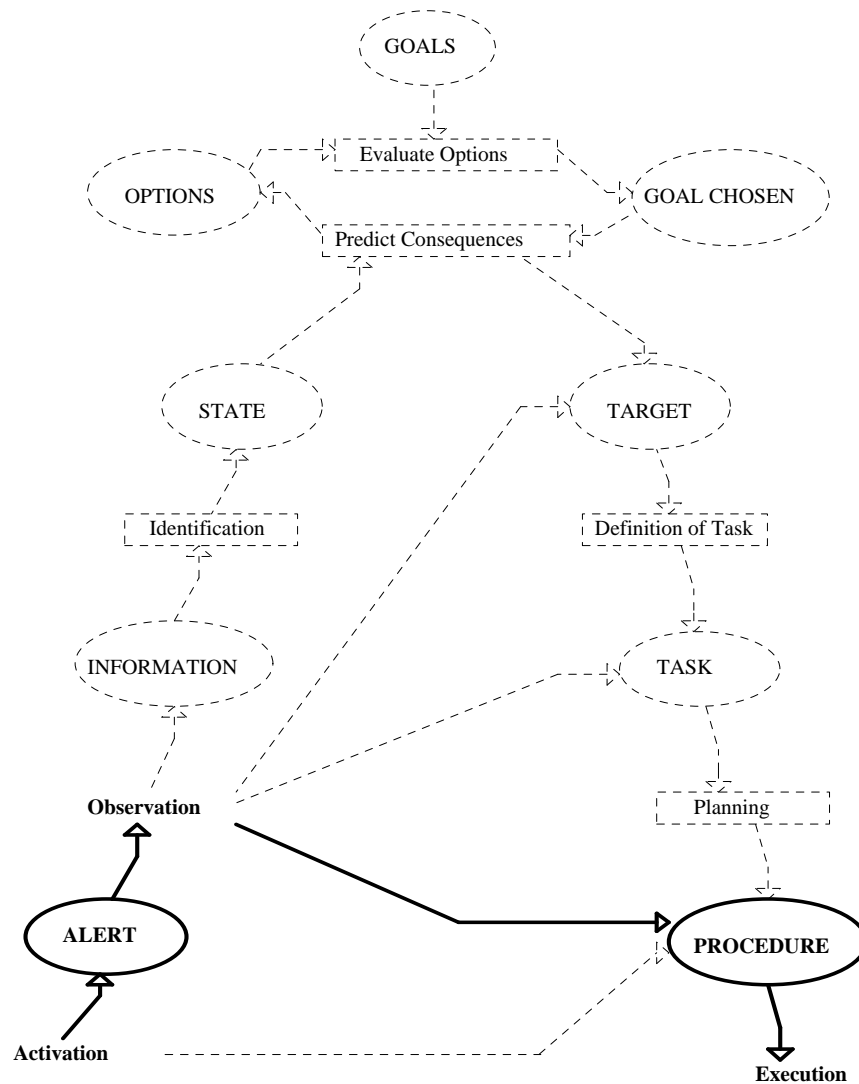


Figure 19 : Proposition de fonctionnement du diagnostic expert (adapté de Rasmussen, 1986).

On vient de voir que le dispositif électronique permet de faire émerger certains comportements qui reflètent l'existence de différents formats de connaissance. Il semble que cette pré-expérience ait mis à jour des données empiriques qui supportent des conceptions théoriques à propos de l'utilisation de la fréquence d'indices environnementaux. On va maintenant essayer de tester ce résultat dans un échantillon plus important en affinant le recueil des données. Les mesures utilisées ici permettent de discuter de la place qu'occupent certains tests dans le diagnostic mais sont qualitativement limitées pour aborder la question de la nature des erreurs commises. On tentera d'apporter une réponse par la mise en place d'indices plus fins.

2.3 EXPERIENCE FINALE EN ELECTRONIQUE

La pré-expérience nous a permis de valider le dispositif électronique et d'observer quelques faits concernant les connaissances mises en œuvre lors d'un diagnostic. On a dégagé comme tendance principale le fait que la performance des experts est sous-optimale dans certains secteurs du diagnostic à cause du poids accordé à la fréquence dans l'activité de diagnostic. On va maintenant tenter de répliquer les résultats avec des effectifs plus importants. L'objectif est de consolider et diversifier les données déjà recueillies. Pour ce faire, on a reconduit la méthode précédente sur des groupes de sujets plus importants. On a également utilisé de nouvelles variables dépendantes. Celles-ci, plus précises et plus nombreuses, devraient permettre d'approcher de plus près les opérations des sujets et de discuter plus finement les erreurs commises.

2.3.1 Méthode

2.3.1.1 Sujets

Les sujets sont 10 experts et 9 novices en électronique. Les experts ont entre 8 et 40 années d'expérience (moy=18,9 ; s=9,1). Ce sont 8 militaires de la Base aérienne 278 d'Ambérieu et de l'Arsenal de Toulon et 2 civils. Les novices sont des élèves de terminale STI électronique du lycée Vauvenargues à Aix en Provence qui ont commencé l'électronique en classe de première.

2.3.1.2 Matériel

2.3.1.2.1 Outils

Pour effectuer son diagnostic, le sujet dispose d'un multimètre et d'un oscilloscope. La tâche est représentée schématiquement sur deux supports : un schéma d'implantation et un schéma théorique. Ces schémas sont identiques à ceux utilisés dans la pré-expérience.

2.3.1.2.2 Dispositif

Le circuit est l'amplificateur basse fréquence utilisé dans la pré-expérience.

2.3.1.3 Description de la panne

La panne est la même que dans la pré-expérience.

2.3.1.4 Consignes

L'expérience se déroule dans un laboratoire de mesure. Le sujet est installé à un poste de travail équipé. L'expérience lui est alors présentée. Ces consignes sont en grande partie identiques à celles de l'expérience précédente. On a rajouté une indication à propos du bon fonctionnement de la radio, de l'alimentation du circuit et de l'exactitude des schémas. Cette précision permet au sujet d'éliminer des opérations hors circuit et des vérifications.

"Je suis étudiant. Je suis ici dans le cadre de mes études. Je vais vous demander de faire un diagnostic sur ce circuit. Je vous montrerai le problème lorsque j'aurai fini de lire ces consignes. Vous devez savoir que ce que je vais vous demander n'est pas une évaluation de vos compétences. Je veux uniquement recueillir des données sur le dépannage. Vos supérieurs¹⁹ ne seront informés des résultats l'étude que de façon anonyme. Etes-vous d'accord pour participer à ce travail ?"

Si l'opérateur refuse, il est écarté de l'expérience.

Pour trouver ce qui ne va pas, vous disposez d'un multimètre et d'un oscilloscope, du schéma théorique et du schéma d'implantation.

Chaque fois que vous effectuez une opération, une mesure, etc., vous devez me dire le nom du composant tel qu'il est écrit dans les schémas, ce que vous en attendez et ce que vous en déduisez. Même si vous ne déduisez rien, vous devez me le dire. J'ai très peu de connaissances en électronique. Je vous demande donc de parler pendant toute la durée de votre travail, pour que je comprenne ce que vous faites.

Il a été décidé de conserver une verbalisation concomitante, conformément à Brinkman (1993). Pour cet auteur, la verbalisation concomitante augmente la charge cognitive mais elle est supportée par la mémoire de travail, contrairement à la verbalisation rétrospective qui repose sur la MLT. Notre objectif est de permettre à l'opérateur de commenter ses opérations lors de leur exécution afin qu'elles soient reliées en temps réel aux objectifs qu'elles poursuivent. L'auto-

¹⁹ Pour les novices, ce mot est remplacé par professeurs.

confrontation et le commentaire d'une séquence filmée est susceptible de rendre ce lien difficile à établir puisque l'opérateur doit rappeler ses objectifs pour justifier ses opérations.

Je vous précise que la radio et l'alimentation fonctionnent et que les schémas sont exacts.

Vous ne pouvez pas toucher les composants qu'avec les instruments de mesure. Si vous avez une intervention à effectuer sur le circuit, vous devez me le demander et c'est moi qui l'effectuerai, selon vos directives.

Vous avez compris les consignes ?

Vous avez des questions ?"

L'expérimentateur répond aux questions éventuelles.

2.3.1.5 Procédure

Le sujet est installé à un poste de travail équipé d'un multimètre et d'un oscilloscope. Après la lecture des consignes, le dispositif est mis en marche (en configuration de panne) et le diagnostic commence. A la différence de la pré-expérience, l'intervention est filmée et les opérations sont ensuite reportées sur la grille utilisée précédemment (Cf. annexe 7.2). Le sujet a la possibilité de changer des composants. L'épreuve s'arrête quand le sujet trouve le composant défectueux ou quand il abandonne. Aucun conseil n'est donné au sujet et l'expérience peut s'arrêter sans que la cause de la panne soit découverte.

Lorsque le sujet est silencieux, l'expérimentateur relance la verbalisation.

2.3.1.6 Plan d'expérience

Le plan est $S < E_2 >$ où E est l'expertise.

2.3.1.7 Variables

2.3.1.7.1 *Variable indépendante*

Expertise, à deux modalités (expert *vs* novice).

2.3.1.7.2 Variables dépendantes

0/ *Panne trouvée ou non*

1/ *Temps*. C'est le temps, en minutes, qui sépare la fin de la lecture des consignes de la localisation de la cause de panne ou du point d'abandon par le sujet.

2/ *Nombre total d'opérations*. Une opération est un test, (mesure, démontage, etc.) ou la consultation d'une source d'information extérieure au circuit lui-même (schémas).

3/ *Nombre d'éléments couverts par les opérations*. Cette variable indique la diversité des éléments à partir desquels le sujet a conduit le diagnostic.

4/ *Pourcentage d'éléments couverts*. Plus la valeur de cette variable est basse, plus le nombre de composants testés est faible.

5/ *Pourcentage d'éléments couverts par rapport au nombre total d'opérations*. On divise le nombre d'éléments couverts par le nombre total d'opérations et on multiplie par 100. Une valeur élevée indique un petit nombre de répétitions et inversement.

6/ *Nombre d'opérations par minute*.

7/ *Nombre d'opérations sur le CI386*.

8/ *Pourcentage d'opérations sur le CI386*. C'est la proportion de la variable 7 par rapport à l'ensemble des opérations.

9/ *Nombre d'opérations sur le CI741*.

10/ *Pourcentage d'opérations sur le CI741*. C'est la proportion de la variable 9 par rapport à l'ensemble des opérations.

11/ *Nombre d'opérations sur les CI (741 + 386)*. C'est la somme de la variable 7 et de la variable 9. Les CI sont des composants actifs et fragiles. Un nombre d'opérations élevé sur ces composants met en évidence la mise en œuvre d'une heuristique de fréquence.

12/ *Pourcentage d'opérations sur les CI (741 + 386)*. C'est la proportion occupée par les opérations sur les CI par rapport à l'ensemble des opérations.

13/ *Nombre d'opérations sur les condensateurs*.

14/ *Pourcentage d'opérations sur les condensateurs*. C'est la proportion de la variable 13 par rapport à l'ensemble des opérations.

15/ *Nombre d'opérations sur les résistances*.

16/ *Pourcentage d'opérations sur les résistances*. C'est la proportion de la variable 15 par rapport à l'ensemble des opérations.

17/ *Nombre d'opérations sur les résistances et condensateurs*. C'est la somme de la variable 13 et de la variable 15. Les résistances et condensateurs sont des composants passifs et fiables. Un

nombre élevé d'opérations sur ces composants indique un éloignement de l'heuristique de fréquence.

- 18/ *Pourcentage d'opérations sur les résistances et condensateurs par rapport au nombre d'opérations sur les CI.*
On divise le nombre d'opérations sur les résistances et condensateurs par le nombre d'opérations sur les CI et on multiplie par 100. On obtient la proportion d'opérations sur composants passifs par rapport aux opérations sur composants actifs.
- 19/ *Pourcentage d'opérations sur les résistances et condensateurs.* C'est la proportion de la variable 17 par rapport à l'ensemble des opérations.
- 20/ *Nombre d'opérations sur C7.* C7 est le composant qui provoque la panne
- 21/ *Pourcentage d'opérations sur C7.* C'est la proportion de la variable 20 par rapport à l'ensemble des opérations.
- 22/ *Nombre d'opérations avant la 1^{ère} opération sur un CI.* Cette variable indique la précocité du 1^{er} test sur un CI.
- 23/ *Nombre d'opérations avant la 1^{ère} opération sur le CI741.*
- 24/ *Nombre d'opérations avant la 1^{ère} opération sur le CI386.*
- 25/ *Pourcentage d'opérations avant la 1^{ère} opération sur un CI.* Cette variable indique la progression (en pourcentage) du diagnostic avant 1^{ère} opération sur un CI.
- 26/ *Pourcentage d'opérations avant la 1^{ère} opération sur le CI741.* Cette variable indique la progression (en pourcentage) du diagnostic avant 1^{ère} opération sur le CI741.
- 27/ *Pourcentage d'opérations avant la 1^{ère} opération sur le CI386.* Cette variable indique la progression (en pourcentage) du diagnostic avant 1^{ère} opération sur le CI386.
- 28/ *Nombre d'opérations avant la 1^{ère} opération sur C5.*
- 29/ *Pourcentage d'opérations avant la 1^{ère} opération sur C5.* C'est la proportion de la variable 28 par rapport à l'ensemble des opérations.
- 30/ *Nombre d'opérations en amont de C5 après la 1^{ère} opération sur C5.* Toutes les opérations en amont de C5 une fois que le signal a été repéré à sa sortie sont inutiles. Ce sont des opérations non optimales.
- 31/ *Nombre d'opérations avant la 1^{ère} opération sur C7.* Ce composant est en court-circuit mais il est fiable. En théorie, ce n'est pas un candidat prioritaire à la panne.
- 32/ *Pourcentage d'opérations avant la 1^{ère} opération sur C7.* C'est la proportion de la variable 31 par rapport à l'ensemble des opérations.
- 33/ *Nombre d'opérations non C7 après la 1^{ère} opération sur C7.*

2.3.1.8 Prédictions

A la suite des données recueillies dans la pré-expérience, on suppose que les experts vont utiliser principalement les CI pour conduire le diagnostic. Ces composants devraient être testés tôt et souvent. On testera les prédictions suivantes.

Le nombre total d'opérations devrait être supérieur chez les experts. Par contre, le nombre d'éléments couverts et leur pourcentage devrait être plus faible chez les experts puisqu'on présume que ces sujets vont tester une moins grande diversité de composants.

Le nombre d'opérations sur les CI, sur le CI386, sur le CI741, les pourcentages d'opérations sur les CI, sur le CI386 et sur le CI741 devraient être plus élevés chez les experts. C'est la mise en œuvre supposée de l'heuristique de fréquence qui guide cette prédiction. De même, compte tenu de la saillance attendue des CI, on prévoit que le nombre d'opérations avant la 1^{ère} opération sur un CI, , les pourcentages d'opérations avant la 1^{ère} opération sur les CI, sur le CI386 et sur le CI741 seront plus faibles chez les experts. Ce groupe de prédictions est central dans notre problématique puisque les CI sont les composants qui supportent le diagnostic expert.

Le nombre d'opérations sur les résistances, sur les résistances et condensateurs ainsi que les pourcentages d'opérations sur ces composants devraient être plus faibles chez les experts puisque ces sujets connaissent leur fiabilité. Pour la même raison, on s'attend à ce que le nombre d'opérations sur C7 et le pourcentage d'opérations sur ce composant soit plus faible chez les experts que chez les novices. Inversement et toujours pour la même raison, on s'attend à ce que le nombre d'opérations avant la 1^{ère} opération sur C7 et le pourcentage d'opérations avant la 1^{ère} opération sur C7 soit plus élevé chez les experts. Enfin, on s'attend à ce que les experts effectuent moins d'opérations et moins de pourcentage d'opérations en amont de C5 après la 1^{ère} opération sur ce composant puisqu'un signal valide à sa sortie implique que les composants en amont sont valides.

2.3.2 Résultats

Les données ont été traitées par une analyse de variance (test F) à un facteur (expertise). Les tables d'analyse de variance figurent en Annexe 7.3. La table des données figure en Annexe 7.4.2. Dans l'ensemble, les résultats vont dans le sens des hypothèses. Les hypothèses centrales à propos des CI ne sont pas rejetées.

Tableau 2 : Table des moyennes des résultats significatifs

n°	VD	VI	moy.	s	p
1	temps (mn)	experts	47	21,44	.058*
		novices	30,22	12,99	
7	nb d'opérations sur CI386	experts	15,9	11,42	.003
		novices	2,3	3,08	
8	% d'opérations sur CI386	experts	25,9	19	.004
		novices	3,6	3	
9	nb opérations CI741	experts	10,7	8,17	.004
		novices	1,55	2,24	
10	% d'opérations sur CI741	experts	13,2	8	.002
		novices	2,12	2	
11	nb opérations sur CI (386 + 741)	experts	26,6	15,73	.0006
		novices	3,77	5,23	
12	% d'opérations sur CI (386 + 741)	experts	39,2	17	.0000
		novices	5,6	5	
14	% d'opérations sur condensateurs	experts	21,7	15	.001
		novices	54,1	21	
18	% d'opérations résistances + condensateurs par rapport aux opérations sur CI	experts	1,69	1,91	.005
		novices	18,27	16,54	
19	% d'opérations sur résistances + condensateurs	experts	41,3	23	.003
		novices	75,1	19	
22	nb d'opérations avant 1 ^{ère} opération sur CI	experts	2,4	2,54	.013
		novices	25,14	25,89	
23	nb d'opérations avant 1 ^{ère} opération sur CI741	experts	3,11	2,57	.063*
		novices	22	29,76	
24	nb d'opérations avant 1 ^{ère} opération sur CI 386	experts	4,6	6,29	.012
		novices	28,14	25,65	
25	% d'opérations avant 1 ^{ère} opération sur un CI	experts	4,47	4,99	.003
		novices	43,7	36	
26	% d'opérations avant 1 ^{ère} opération sur le CI741	experts	5,77	6,41	.026
		novices	26,39	23,59	
27	% d'opérations avant 1 ^{ère} opération sur le CI386	experts	4,66	8,24	.001
		novices	48,23	33,41	
31	nb d'opérations avant 1 ^{ère} opération sur C7	experts	61,57	42,5	.014
		novices	10,5	5,39	
32	% d'opérations avant 1 ^{ère} opération sur C7	experts	67,4	45,5	.07*
		novices	23,4	18,5	
33	nb d'opérations non C7 après 1 ^{ère} opération sur C7	experts	4,42	8,58	.025
		novices	37,67	32,98	

* Ces résultats sont des tendances.

Un expert sur deux (5/10) a trouvé la cause de la panne (VD0) (C7 en court-circuit) contre 2 novices sur 9 mais ce résultat, bien qu'allant dans le sens de l'hypothèse, n'atteint pas le seuil de significativité. Le Tableau 2 résume les résultats significatifs dans l'ordre dans lequel les variables ont été présentées dans la méthode. Comme pour la pré-expérience, ils seront présentés dans le texte en valeurs brutes puis en pourcentages. Les tables d'analyse de variance figurent en annexe 7.3.1.

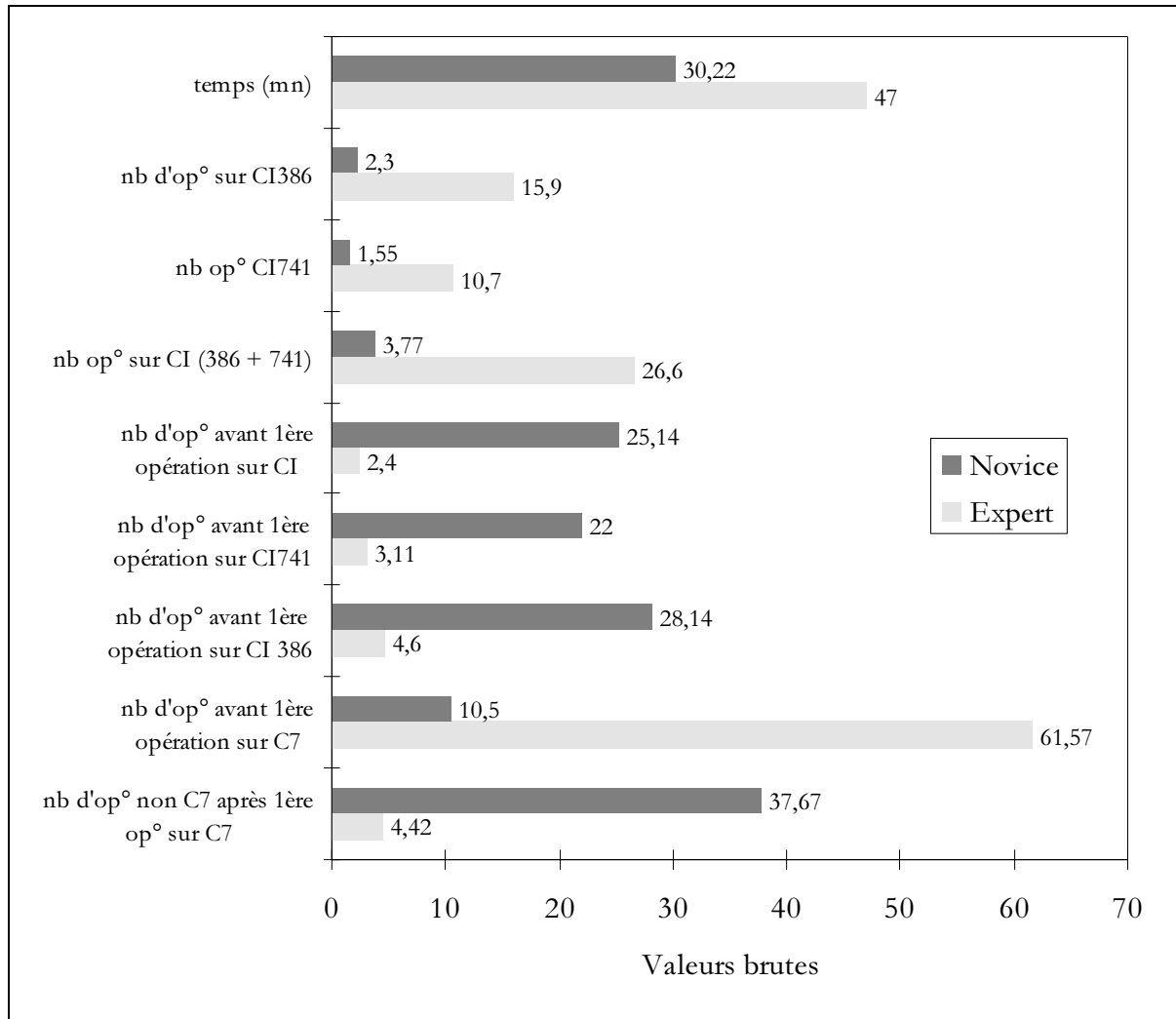


Figure 20 : Représentation graphique des résultats significatifs en valeurs brutes

Le point d'arrêt de la passation est la découverte de la cause de la panne ou l'abandon du sujet. Comme indiqué par la Figure 20, les experts tendent à prendre plus de temps pour arriver à ce point (VD1) que les novices (experts=47 mn ; novices=30,22 mn) ($F(1;17)=4,129$; $p=.058$). Experts et novices ne se différencient pas significativement sur le nombre total d'opérations (VD2), les éléments couverts par les opérations (VD3) et le nombre d'opérations par minute (VD6).

Les experts font plus d'opérations sur le CI386 (VD7) que les novices (experts=15,9 ; novices=2,3) ($F(1;17)=11,848$; $p=.003$). Ils font plus également d'opérations sur le CI741 (VD9) (experts=10,7 ; novices=1,55) ($F(1;17)=10,483$; $p=.004$). Dans l'ensemble, ils effectuent plus d'opérations sur les CI (VD11) que les novices (experts=26,6 ; novices=3,77) ($F(1;17)=17,133$; $p=.0006$). Les experts effectuent moins d'opérations avant le premier test du CI386 (VD24) (experts=4,6 ; novices=28,14) ($F(1;15)=7,95$; $p=.012$). On constate une tendance allant dans le même sens à propos du nombre d'opérations avant le 1^{er} test du CI741 (VD23) (experts=3,11 ; novices=22) ($F(1;12)=4,183$; $p=.063$). Dans l'ensemble, les experts effectuent moins d'opérations avant le 1^{er} test de CI (VD22) (experts=2,4 ; novices=25,14) ($F(1;15)=7,827$; $p=.013$).

Les performances des sujets ne montrent pas de différence sur le nombre d'opérations sur les condensateurs (VD13), le nombre d'opérations sur les résistances (VD15) et le nombre total d'opérations sur les résistances et condensateurs (VD17).

Experts et novices ne se distinguent pas significativement sur le nombre d'opérations sur le composant C7 (VD20). Par contre, on note des différences significatives sur le nombre d'opérations avant le 1^{er} test de C7 (VD31) (experts=61,57 ; novices=10,5) ($F(1;11)=8,43$; $p=.014$). On remarque également une différence significative sur le nombre d'opérations (C7 exclus) après le 1^{er} test de C7 (VD33) (experts=4,42 ; novices=37,67) ($F(1;11)=6,67$; $p=.025$).

On ne remarque pas de différence significative entre les deux groupes de sujets sur le nombre d'opérations avant le 1^{er} test de C5 (VD28) et sur le nombre d'opérations en amont de C5 après le 1^{er} test de ce composant (VD30).

Il n'y a pas de différence significative entre experts et novices sur le pourcentage d'éléments couverts (VD4) et le pourcentage d'éléments couverts dans le nombre total d'opérations (VD5).

Comme le montre la Figure 21, le pourcentage d'opérations sur le CI386 (VD8) est plus important chez les experts (experts=25,9 ; novices=3,6) ($F(1;17)=10,888$; $p=.004$). Le pourcentage d'opérations sur le CI741 (VD10) est également plus important chez eux (experts=13,2 ; novices=2,12) ($F(1;17)=13,095$; $p=.002$). Dans l'ensemble, le pourcentage d'opérations sur les CI (741 + 386) (VD12) est plus important chez les experts que chez les novices (experts=39,2 ; novices=5,6) ($F(1;17)=30,59$; $p=.0000$).

Le pourcentage d'opérations sur les condensateurs (VD14) montre des différences significatives (experts=21,7 ; novices=54,1) ($F(1;17)=14,56$; $p=.001$). Le pourcentage d'opérations sur les résistances et condensateurs (VD19) montre également des différences significatives (experts=41,3 ; novices=75,1) ($F(1;17)=11,34$; $p=.003$). Le pourcentage des

opérations sur les résistances et condensateurs par rapport au nombre d'opérations sur les CI (VD18) montre une différence significative (experts =1,69 ; novices=18,27) ($F(1;17)=9,96$; $p=.005$). En d'autres termes, les opérations accordées par les experts aux résistances et condensateurs ne représentent, en comparaison, qu'une petite partie des opérations qu'ils accordent aux CI. Le pourcentage d'opérations sur les résistances (VD16) ne distingue pas les deux groupes de sujets.

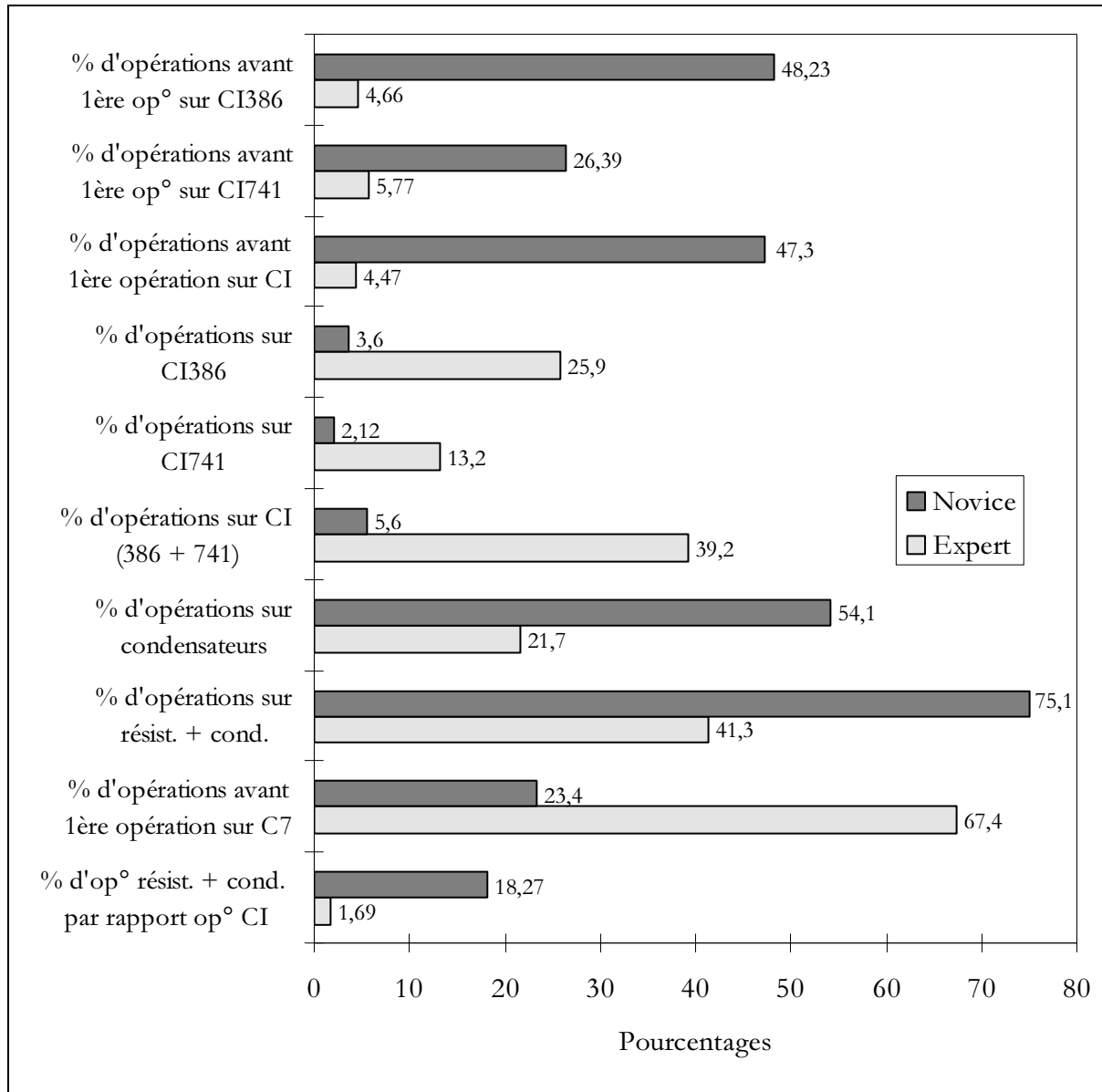


Figure 21 : Représentation graphique des résultats significatifs en pourcentages.

Experts et novices se distinguent significativement sur le pourcentage d'opérations avant la 1ère opération sur un CI (VD25) (experts=4,47 ; novices=43,7) ($F(1;15)=11,881$; $p=.003$), sur le pourcentage d'opérations avant la 1ère opération sur le CI741 (VD26) (experts=5,77 ;

novices=26,39) ($F(1;12)=6,414$; $p=.026$) et sur le pourcentage d'opérations avant la 1^{ère} opération sur le CI386 (VD27) (experts=4,66 ; novices=48,23) ($F(1;15)=16,035$; $p=.001$).

Le pourcentage d'opérations sur C7 (VD21) et le pourcentage d'opérations avant le premier test de C5 (VD29) ne montrent pas de différence significative.

Enfin, on note une tendance sur le pourcentage d'opérations avant la première opération sur C7 (VD32) (experts=67,4 ; novices=23,4) ($F(1;10)=4,086$; $p=.07$).

2.3.3 Discussion

L'exposé des résultats permet de remarquer que certaines variables dépendantes ne départagent pas les deux groupes de sujets. Parmi elles, on note le nombre d'opérations, les éléments couverts et leur pourcentage ainsi que le nombre d'opérations par minute. En regard de la pré-expérience, il est clair que le plus grand nombre d'opérations effectué par les experts n'a pas pu être répliqué ici. On remarque également que la diversité des composants qui supporte le diagnostic n'est pas différente chez les experts et chez les novices.

On note que certains résultats sur les résistances et condensateurs ne sont pas significatifs. Si ces variables de ce type sont un indicateur de l'activité des sujets, ce n'est pas celui sur lequel les opérateurs se différencient le plus. Les sujets ne se différencient pas sur le nombre d'opérations sur C7 ou son pourcentage. Les experts, lorsqu'ils mesurent la valeur de ce composant, constatent qu'il est défaillant. Cette mesure marque la fin du diagnostic des experts. Les novices semblent considérer l'absence de mesures valides sur C7 comme une donnée supplémentaire à prendre en compte dans l'élaboration de la représentation de la panne et non comme une donnée cruciale. On reviendra sur ce point plus loin. Enfin, on remarque une absence de données significatives autour de C5. Dans la mesure où ce composant est une porte entre l'étage du CI741 et l'étage du CI386, l'absence de résultat sur ce composant met en question, du moins dans cette expérience, l'importance du split-half. Un des tests les plus puissants que les sujets peuvent mettre en œuvre dans cette tâche consiste à mesurer la valeur du signal à la sortie de C5. Si un signal est présent et que ce signal ressemble à celui mesuré à l'entrée du circuit, alors tout l'étage du CI741, soit plus de la moitié des composants, est en état de marche. Le diagnostic peut alors être centré sur l'étage du CI386. Les données ne permettent pas de conclure que c'est cette stratégie qui est mise en œuvre. On peut penser que les sujets, confrontés à un circuit qu'ils ne connaissent pas, ne parviennent pas à détecter la position centrale de C5 et l'intérêt que présente ce composant dans ce dépannage. Les schémas théorique et d'implantation permettent ce type d'identification mais tout porte à croire qu'ils ne sont pas

consultés dans ce but. Contrairement à la prise d'information dans les plans géographiques qui s'effectue plutôt des bords vers le centre (Rossano & Morrison, 1996), la lecture des circuits électriques s'effectuerait *"dans le sens du déplacement du courant"* et le raisonnement reposerait sur des *"traits de surface privilégiant l'aspect directionnel"* (Amigues, 1985, p. 65). Selon cet auteur, les opérateurs aboutiraient à une représentation du schéma du circuit en termes d'indépendance entre un amont et un aval. Dans le cas des experts de notre expérience, en admettant que les opérations du sujet reflètent les connaissances qu'il met en œuvre, il est clair que la représentation du circuit n'est pas séquentielle puisque les opérations qu'ils effectuent portent préférentiellement sur certains composants prioritaires. L'éventuelle scission du circuit en un amont et un aval autour de C5 est moins évidente. Sur un plan stratégique, cela prive les opérateurs d'un test puissant et d'une économie de temps et d'opérations. Pour Lowe (1996), la lecture de diagrammes doit dépasser les caractéristiques visuo-spatiales de ce qui est dessiné. Le sujet doit construire une représentation du système à partir de ce qu'il lit. En ce qui concerne les experts électroniciens, la représentation globale du circuit semble déformée par l'aspect prioritaire des opérations sur les CI.

Les experts ont tendance à consacrer plus de temps au diagnostic que les novices. Ils font plus d'opérations sur le CI386 et le CI741 et la part qu'occupent ces tests est plus importante que chez les novices. On remarque également que les experts testent les CI plus tôt et la proportion de tests accordée aux condensateurs est plus faible chez eux. Rapportées au nombre de tests sur les CI ou au nombre total d'opérations, les opérations sur les résistances et condensateurs sont moins nombreuses chez les experts que chez les novices. Ces données tendent à conforter l'idée que les experts utilisent leur connaissance de la fiabilité relative des composants. Ils testent C7 plus tard que les novices. Ce résultat brut tend à se vérifier également proportionnellement au nombre total d'opérations. Par contre, une fois qu'ils ont testé C7, les experts sont à moins de 5 opérations de la fin de leur diagnostic alors que les novices effectuent encore plus d'une trentaine d'opérations. Cet ensemble de résultats permet d'aborder la question de l'économie dans le diagnostic autour du clivage résistances-condensateurs *vs* CI. Les résistances et les condensateurs sont des composants fiables. En conséquence, un grand nombre d'opérations sur ce type de composant va à l'encontre du principe d'économie. Parallèlement, les sujets qui utilisent le moins ce type de tests (les experts) sont également ceux qui consacrent le plus d'opérations sur les CI. Cela reflète le clivage qui existe entre les deux groupes de sujets s'agissant du type de données traitées dans le diagnostic.

En comparant les résultats de la pré-expérience et ceux recueillis ici, la place des CI dans le diagnostic et la précocité des opérations qui les concernent sont des données confortées. Il faut ajouter que le plus petit nombre d'opérations accordées aux résistances et condensateurs par les

experts est une donnée dont il n'a pas été tenu compte dans la pré-expérience mais qui fait émerger des résultats cohérents avec ce qui a été recueilli pour les CI. Comme il a déjà été dit, l'économie pousse les experts à hiérarchiser les composants et à accorder la priorité de la mesure aux CI.

2.3.3.1 Fiabilité des composants, principe d'économie et heuristique de fréquence

L'heuristique de fréquence impose de placer les CI vers le début du plan de test car les symptômes en tout ou rien (pas de signal de sortie) orientent le diagnostic vers cette catégorie de composants. Pour illustrer le propos, il peut être utile de rapporter certains événements qui ont perturbé le déroulement des passations. Certains sujets (qui ont été éliminés de l'analyse) se sont trouvés face à une panne fuyante. Cette panne était causée par la défaillance non provoquée du potentiomètre (composant P). Le signal parvenait au haut-parleur mais de manière intermittente. Les sujets (principalement des experts) qui ont travaillé avec ces symptômes ont abandonné les tests sur les CI et ont recherché des faux contacts ou une panne de condensateur. Ces conditions incidentelles suggèrent que les traits de surface sont les déterminants principaux du diagnostic et que les connaissances activées lors du dépannage reposent très fortement sur ces traits. Ces incidents permettent de pointer les associations qui sont mises en œuvre en fonction des symptômes extraits et l'orientation spécifique du diagnostic qui en découle. L'heuristique de fréquence associe les symptômes à leurs causes sur la base des occurrences passées. Elle est un outil précieux dans le cas où les symptômes reflètent l'état du circuit. Dans cette expérience, on est dans un cas de figure où les symptômes ne sont pas ceux qui sont le plus souvent associés à la cause de la panne. Il s'ensuit que la fréquence des occurrences passées n'est pas le meilleur support du diagnostic car elle fait se centrer les experts sur des composants valides.

Les seuls symptômes ne déterminent pas le niveau de difficulté du diagnostic. C'est plutôt leur ressemblance à du connu qui va déterminer la performance de l'opérateur. Dans notre panne, les symptômes ne présentent pas de traits saillants puisque le circuit ne fonctionne pas. C'est en comparant ce qui est mesuré avec ce qui aurait dû être mesuré que le diagnostic se construit. La confirmation des attentes est une part importante du processus de diagnostic en générale et de l'affinement de la représentation de la panne en particulier. Celle-ci évolue au fil des opérations effectuées. Les sujets experts semblent démarrer le diagnostic sur la base d'un plan routinier. Leurs premières opérations concernent l'alimentation et les CI. Une fois les CI testés, le diagnostic se poursuit autour de ces composants mais de manière moins routinière. Le type de symptômes en tout ou rien est une source d'information en soi mais il ne permet pas de désigner un composant en particulier. Dès lors que l'alimentation et les CI ont été testés, le reste des

composants, qu'on pourrait qualifier de deuxième rang, constitue un pool large duquel il faut extraire de l'information susceptible de guider le travail.

2.3.3.2 Sous-optimalité

Les informations extraites d'un système ne sont des symptômes qu'une fois que leur caractère pertinent au regard de la panne a été détecté par le sujet. Si, même après l'avoir testé, les novices accordent moins d'importance à C7 que les experts, il faut tout de même noter qu'il testent ce composant à un stade d'avancement du diagnostic plus précoce (VD29 : experts=67% ; novices=23%). On trouve ici un des effets pervers de l'utilisation de la fréquence par l'expert comme indice d'extraction des symptômes. Il effectue un plus grand nombre d'opérations que le novice avant de tester C7 pour la première fois.

Le deuxième fait de sous-optimalité concerne la centration du diagnostic expert sur les CI. Dans une panne classique, c'est à dire une panne dans laquelle la correspondance entre symptômes et cause respecte les régularités constatées dans le passé, les experts ont intérêt à établir et respecter la hiérarchie de ces correspondances. Ici, ce comportement est considéré comme sous-optimal puisqu'en l'occurrence, les CI ne sont pas en cause dans la panne. On parlera de biais de fréquence pour caractériser ce comportement.

Ces deux derniers points de sous-optimalité expliquent en partie le troisième. Les experts ont mis plus de temps que les novices à trouver la cause de la panne ou à atteindre le point d'abandon. La variable temps est un indicateur superficiel des activités cognitives puisque la nature des traitements et leur nombre ne peuvent pas être approchés. On peut tout de même retenir que la rapidité de l'expert ne doit pas être considérée comme un invariant.

Le dernier fait de sous-optimalité concerne le composant C5. Il est situé entre le premier (CI741) et le deuxième étage (CI386). De par sa position, il permet d'effectuer un test puissant et très informateur sur toute la première moitié du circuit. S'il est exact que les sujets ne détectent pas la position centrale de C5, alors on peut penser qu'ils ont une perception incomplète du circuit, que l'image qu'ils s'en font ne reflète pas les caractéristiques spatiales du montage.

Les quatre points de sous-optimalité qu'on vient d'aborder soutiennent l'idée que les novices peuvent montrer des comportements plus performants que ceux des experts. Le fait que ces derniers tentent de résoudre les problèmes en activant des solutions à partir des informations contextuelles est sans doute central dans l'explication de cette différence. On peut avancer une ébauche de conclusion en affirmant que les erreurs des experts concernent en grande partie l'activation des connaissances en tant que mode de résolution de problème. Chez les novices,

l'activation permet de récupérer des connaissances depuis la MLT. Ces connaissances permettent d'effectuer des traitements et de construire un raisonnement pas à pas. Chez les experts, il semble que le même mécanisme récupère des blocs de connaissances assemblées en procédures prêtes à l'emploi. Le raisonnement est réduit à un appariement.

2.4 CONCLUSION DES PASSATIONS EN ELECTRONIQUE

Pour Reason (1990), un schéma se satisfait d'activateurs grossiers. C'est une des caractéristiques des schémas d'action *"en relation avec l'économie cognitive et la libération de la capacité attentionnelle"* (p. 113). L'effet est le déclenchement d'un schéma inadapté (et les décisions qui s'ensuivent) à la situation en cours. Selon Reason, au niveau des automatismes, l'activité humaine est contrôlée par des configurations mémorisées d'instructions préprogrammées qui sont déclenchées lorsque *"l'état actuel de l'environnement est conforme aux régularités observées dans le passé"* (p. 104). Pour Patrick (1993), les pannes les plus difficiles à identifier sont celles qui invalident les présupposés normalement faits par l'opérateur. La difficulté causée par la panne étudiée repose sur la remise en cause de l'hypothèse la plus fréquente. Les symptômes extraits conditionnent l'évocation du schéma qui, à son tour, conditionne les causes de panne potentielles que le sujet récupère. Dans la tâche qui nous intéresse, les experts ont eu des difficultés à trouver la cause de la panne puisque la défectuosité du CI est une cause de panne satisfaisante.

Au travers de la pré-expérience et de l'expérience finale, on a pu s'apercevoir que la conception classique de l'expertise selon laquelle les opérateurs experts montrent des comportements rapides et fiables doit être modulée par l'existence d'un biais de fréquence. Ce biais éloigne les opérateurs experts du composant en panne, fait consacrer beaucoup d'opérations à des composants valides et augmente le temps de travail. On peut objecter à ces données qu'elles ont été recueillies dans une situation de panne atypique, reflétant incomplètement les conditions optimales de mise en œuvre d'une expertise. Celle-ci est souvent mise en évidence dans des conditions de travail routinières où les régularités du passé donnent toute sa puissance à l'heuristique de fréquence. Le fait à retenir est que les experts ont traité une panne rare comme une panne fréquente. Les indices situationnels ne leur ont pas permis de déceler le caractère atypique de la panne. C'est dans ces situations que l'expertise peut devenir génératrice de comportements erronés.

Le contenu de la troisième partie de cette thèse (Cf. 3 Accidents des transports et catastrophes industrielles) est de nature industrielle. On essaiera de pointer les liens qui existent entre les résultats obtenus ici et des faits industriels. On pourra s'apercevoir que les erreurs de diagnostic dans le raisonnement expert ne sont pas un artefact expérimental. Ils ont une réalité tangible et particulièrement intéressante du point de vue ergonomique. Avant d'en arriver à ce point, il nous faut explorer notre hypothèse théorique plus avant. Nous allons maintenant nous tourner vers un autre domaine technique dans lequel nous allons tenter de déceler des patterns comportementaux similaires à ceux trouvés en électronique.

2.5 PRE-EXPERIENCE EN MECANIQUE

Cette thèse se situe dans une optique de compréhension de l'opérateur dans son travail en utilisant les cadres théoriques de la psychologie cognitive. C'est en partie une mise à l'épreuve de nos connaissances qui est faite en tentant d'ignorer les particularités des domaines d'activités des opérateurs et en essayant de mettre à jour des conduites générales. Cette seconde série pré-expérience/expérience tente d'étendre les résultats obtenus en électronique vers un autre domaine technique. On se souvient que l'hypothèse théorique pose que les erreurs des experts ont pour origine la mise en œuvre d'un raisonnement automatisé dans des conditions non favorables. L'hypothèse théorique pose également que les mécanismes d'erreur sont indépendants du domaine. Ce sont les enjeux de la seconde partie expérimentale dans laquelle nous allons étudier le diagnostic en mécanique auto.

2.5.1 Méthode

2.5.1.1 Sujets

Les sujets sont 8 novices et 8 experts en mécanique auto. Les experts sont des mécaniciens auto qui ont entre 10 et 33 d'expérience (moy=17,37 ; s=7,63). Les novices sont des élèves de CAP et BEP du Lycée Sainte Victoire à Aix en Provence.

2.5.1.2 Matériel

2.5.1.2.1 *Outils*

Les sujets disposent de tous les outils à main d'un atelier (tournevis, clés, cales, etc.). Ces outils sont rassemblés dans une caisse unique qui a servi à tous les sujets. Sous certaines conditions (clé d'une dimension particulière par exemple), les sujets peuvent utiliser des outils ne figurant pas dans la caisse. Les outils électroniques d'assistance au diagnostic et les appareils de mesure tels que multimètre sont exclus à des fins de standardisation. Ces outils ne sont pas nécessaires pour déterminer la cause de la panne. Les sujets disposent de la Revue Technique automobile de la Renault 25 (dont le moteur est utilisé ici comme dispositif expérimental ; Cf. Figure 22).

2.5.1.2.2 Dispositif

Le dispositif expérimental est un moteur à essence de RENAULT 25 TS de 1984. Il est monté sur un berceau, lequel est vissé sur le plateau d'une remorque. De par sa position, le moteur ne présente aucune difficulté d'accès vers quelque élément que ce soit. Certains organes périphériques du moteur ont été déplacés de leur position d'origine à des fins de compacité et de transportabilité. Ces organes sont la batterie, posée sur le plateau de remorque, le filtre à air, branché directement sur le collecteur d'air du carburateur, le réservoir de carburant, à l'arrière du plateau de remorque, le réservoir de liquide de refroidissement et le module d'allumage. Ces déplacements ne modifient pas le fonctionnement du moteur.

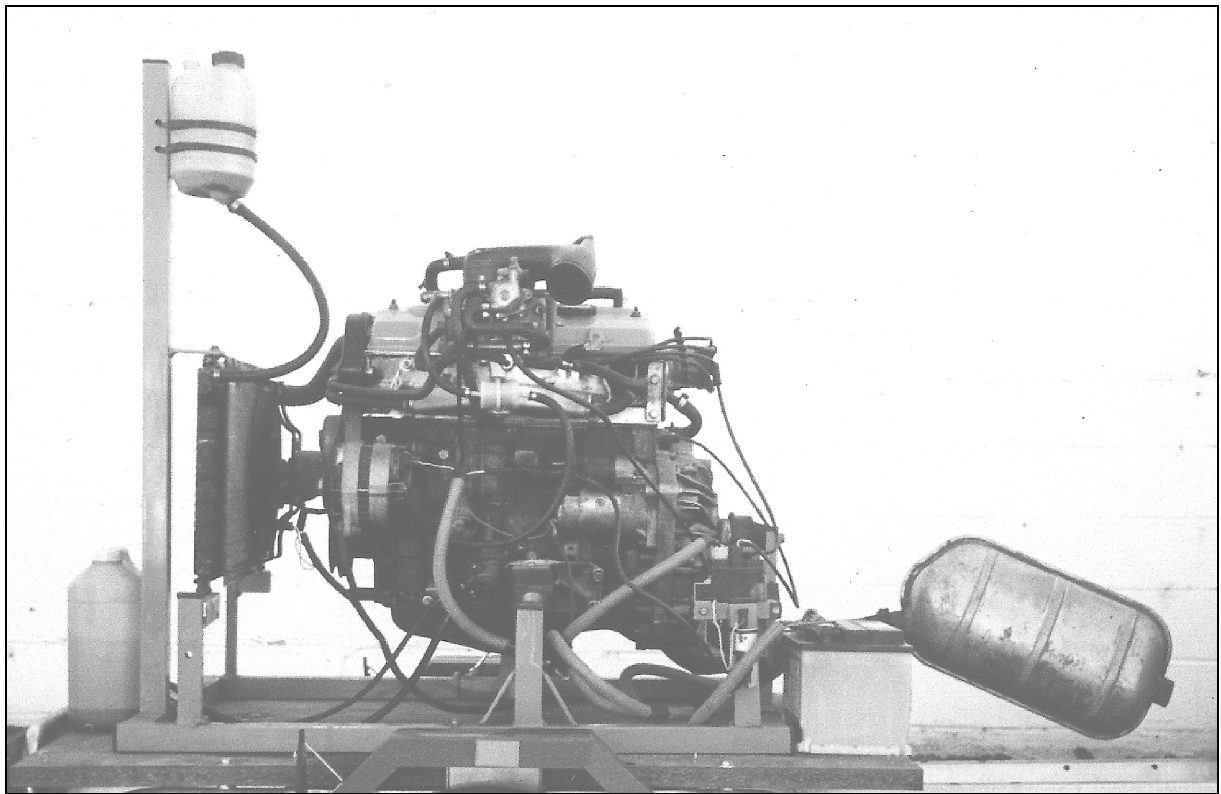


Figure 22 : Le dispositif expérimental.

2.5.1.3 Description de la panne

Sur un moteur à carburateur (tel que celui utilisé ici), le piston qui descend dans le cylindre crée une dépression. Au début de la descente, la soupape d'admission s'ouvre et l'air chargé d'essence est aspiré depuis le carburateur via la tubulure d'admission. Puis la soupape

d'admission se ferme et le piston remonte pour compresser les gaz. Au sommet de la course du piston²⁰, la bougie produit une étincelle qui fait exploser le mélange. Cette explosion repousse fortement le piston vers le bas. C'est le temps moteur. Puis la soupape d'échappement s'ouvre et le piston remonte à nouveau en évacuant les gaz brûlés. La soupape d'échappement se ferme et celle d'admission s'ouvre. C'est la balance. Le piston descend, aspire le mélange et le cycle recommence.

La panne est causée par une plaque en aluminium qui obstrue le tube d'admission du 4^{ème} cylindre. Cette plaque est percée d'un trou de 4mm de diamètre afin de diminuer la formation de fumées bleues à l'échappement. Ces fumées sont généralement causées par de l'huile qui remonte depuis le carter vers le cylindre et qui est brûlée en même temps que l'essence. Le trou dans la plaque d'obstruction empêche la formation de remontées d'huile trop importantes sans les supprimer totalement. La plaque provoque les symptômes suivants :

- . Le moteur tourne sur trois cylindres puisque le 4^{ème}, faute d'essence, n'explose pas ;
- . La bougie du 4^{ème} cylindre allume mais elle est grasse du fait des remontées d'huile ;
- . Le 4^{ème} cylindre a un taux de compression bas (6,5 bars au lieu de 10 à 11 bars) du fait du petit volume de mélange qui parvient au cylindre.

Tout ou partie de ces symptômes peut être provoqué par plusieurs causes naturelles (un piston percé, une soupape grillée²¹ ou bridée ou encore un problème de segmentation). Ces causes de panne peuvent survenir simultanément. C'est la proximité des symptômes provoqués par la plaque de ceux provoqués par ces causes naturelles qui a justifié l'obstruction de la tubulure d'admission. Bien qu'extrêmement rare²², la panne créée permet de simuler un dysfonctionnement qui partage les mêmes traits de surface que des causes connues et maîtrisées par les opérateurs.

2.5.1.4 Consignes

L'expérience se déroule dans un atelier de mécanique. Avant la lecture des consignes, le sujet examine visuellement le moteur. Cet examen permet au sujet de reconnaître les organes du moteur qui sont dans une configuration inhabituelle.

²⁰ C'est le point mort haut (PMH).

²¹ Par soupape grillée, les mécaniciens entendent une soupape dont la portée est érodée et qui n'est plus étanche.

²² Mais possible dans des conditions naturelles de fonctionnement, d'utilisation et d'entretien.

"Je suis étudiant. Je suis ici dans le cadre de mes études. Je vais vous demander de faire un diagnostic sur ce moteur. Je vous montrerai le problème après avoir démarré, lorsque j'aurai fini de lire ces consignes. Vous devez savoir que ce que je vais vous demander n'est pas une évaluation de vos compétences. Je veux uniquement recueillir des données sur le dépannage. Vos supérieurs²³ ne seront informés des résultats l'étude que de façon anonyme. Etes-vous d'accord pour participer à ce travail ?"

Si l'opérateur refuse, il est écarté de l'expérience.

"Pour trouver ce qui ne va pas, vous pouvez utiliser tous les outils de cette caisse (l'expérimentateur désigne la caisse à outils). Vous ne pouvez pas utiliser d'appareil électronique de diagnostic.

Chaque fois que vous effectuez une opération, un démontage, une mesure, etc., vous devez me dire le nom de la pièce, ce que vous en attendez et ce que vous en déduisez. Même si vous ne déduisez rien, vous devez me le dire. J'ai très peu de connaissances en mécanique. Je vous demande donc de parler pendant toute la durée de votre travail, pour que je comprenne ce que vous faites.

La verbalisation concomitante a été conservée.

Vous disposez de la revue technique. Vous pouvez la consulter aussi souvent et aussi longtemps que vous le voulez.

Vous avez compris les consignes ?

Vous avez des questions ?"

L'expérimentateur répond aux questions éventuelles.

2.5.1.5 Procédure

Après la lecture des consignes, la tâche commence. L'intervention de l'opérateur est filmée et les opérations sont reportées ensuite sur une grille (Cf. Annexe 7.2). La passation s'arrête lorsque le sujet a trouvé la cause de la panne ou lorsqu'il abandonne. Aucun conseil ou directive n'est donné au sujet, à l'exception de recommandations visant à protéger le dispositif expérimental lors d'interventions jugées maladroites.

Les sujets ont tendance à poser des questions sur le moteur, son état, son histoire, afin d'éliminer certaines causes. Par exemple, en sachant que le moteur a servi sur la route pendant

²³ Pour les novices, ce mot est remplacé par professeurs.

plus de 100 000 km (ce qui est une donnée valide), les mécaniciens peuvent centrer leur travail sur certains types de panne. Ces questions sont habituelles dans la profession et l'expérimentateur y répond lorsqu'elles lui sont posées.

2.5.1.6 Plan d'expérience

Le plan est $S < E_2 >$, où E est le niveau d'expertise.

2.5.1.7 Variables

2.5.1.7.1 *Variable indépendante*

Expertise à deux modalités (expert *vs* novice).

2.5.1.7.2 *Variables dépendantes*

- 1/ *Nombre total d'opérations*. Une opération désigne toute action sur le système, par exemple une mesure, un démontage ou la consultation d'une source d'information extérieure au moteur lui-même (par exemple la revue technique).
- 2/ *Tirer le fil 4*. Lorsque le moteur tourne, débrancher le fil de bougie du 4^{ème} cylindre permet de savoir si ce cylindre explose ou non. Si le régime du moteur ne chute pas lorsqu'on débranche ce fil, alors ce cylindre n'explose pas.
- 3/ *Pourcentage d'opérations "tirer le fil 4"*. C'est la proportion de la variable 2 dans l'ensemble des opérations.
- 4/ *Tirer les fils*. Cette variable dichotomique (oui/non) indique que le sujet a ou n'a pas tiré au moins un fil de bougie lors du diagnostic.
- 5/ *Nombre d'opérations avant de tirer un fil*. Cette donnée indique la précocité de cette opération dans le diagnostic.
- 6/ *Pourcentage d'opérations avant de tirer un fil*. C'est la progression (en pourcentage) du diagnostic avant de tirer le premier fil de bougie.
- 7/ *Toutes opérations sur le cylindre 4*. C'est l'ensemble des opérations électriques ou mécaniques qui portent sur ce cylindre.
- 8/ *Pourcentage d'opérations sur le cylindre 4*. C'est la proportion de la variable 7 dans l'ensemble des opérations.
- 9/ *Opérations électriques*. Les organes électriques sont des éléments tels que fils de bougies, bougies, module HT, fil HT.

- 10/ *Pourcentage d'opérations électriques*. C'est la proportion de la variable 9 dans l'ensemble des opérations.
- 11/ *Opérations mécaniques*. Ce sont des opérations sur les culbuteurs, des resserrages, des démontages, etc.
- 12/ *Pourcentage d'opérations mécaniques*. C'est la proportion de la variable 11 dans l'ensemble des opérations.

2.5.1.8 Prédictions

On s'attend à ce que les experts effectuent plus d'opérations que les novices. Dans la mesure où ils travaillent selon des règles d'économie, on s'attend à ce qu'ils tirent les fils plus souvent que les novices et que le pourcentage de ce test sur le nombre total d'opérations soit plus important. Experts et novices devraient tirer des fils de bougies car ce test est indispensable. Le nombre d'opérations avant d'effectuer ce type d'opération et son pourcentage devraient être très bas chez les experts puisque c'est un moyen de recueillir des informations importantes vis-à-vis des symptômes. Puisque c'est le cylindre 4 qui présente des symptômes anormaux et puisqu'on pense qu'ils sont soumis à un biais, les experts devraient effectuer un plus grand nombre d'opérations sur ce cylindre que les novices et le pourcentage de ces opérations devrait être plus grand chez eux. Les causes pour lesquelles un cylindre n'explose pas sont le plus souvent électriques. Conformément à notre hypothèse théorique d'un biais de fréquence, les experts devraient effectuer plus opérations électriques que les novices et le pourcentage de ces opérations devrait être important chez eux. Les opérations mécaniques et leur proportion devraient nous permettre de recueillir des informations complémentaires des autres variables.

2.5.2 Résultats

Tableau 3 : Table des moyennes des résultats significatifs

VD	Intitulé	VI	moy.	s	p
1	nb total d'opérations	experts	10,75	5,203	.015
		novices	17,37	4,438	
3	% d'opérations "tirer le fil4"	experts	19,04	3,7	.006
		novices	9,6	7,3	
5	nb op° av. tirer un fil	experts	0	0	.044
		novices	3,66	4,676	
6	% d'op° av. tirer fil	experts	0	0	.034
		novices	24	28,9	
8	% op° sur le cylindre 4	experts	34,7	7,7	.001
		novices	18,1	9,5	
9	nb d'op° électriques	experts	8,5	3,545	.071*
		novices	12,12	3,870	

* Ce résultat est une tendance.

Les résultats de cette expérience font l'objet d'une publication (Besnard & Cacitti, soumis). La table des données figure en Annexe 7.4.3. Deux experts seulement ont trouvé la panne. Dans les deux cas, les indices qui ont supporté leur diagnostic ont été visuels. La différence de couleur entre la plaque du 4^{ème} cylindre et les joints des trois autres cylindres les a amenés à tester (par le démontage de la tubulure d'admission) la possibilité d'une obstruction. Cette différence de couleur sera annulée dans l'expérience suivante et une critique sera apportée. Le Tableau 3 résume les résultats significatifs. Les tables d'analyses de variance figurent en annexe 7.3.2. Comme auparavant, on présentera les valeurs brutes puis les pourcentages.

La Figure 23 montre une différence dans le nombre total d'opérations (VD1) ($F(1;14)=5,507$; $p=.015$) effectuées par les deux groupes de sujets. Les experts effectuent moins d'opérations que les novices (10,75 *vs* 17,37). Le nombre d'opérations avant de tirer un fil (VD5) diffère significativement entre experts et novices ($F(1;12)=5,059$; $p=.044$). Les experts effectuent ce test plus tôt que les novices (0 *vs* 3,66). La différence du nombre d'opérations électriques (VD9) entre experts et novices (8,5 *vs* 12,12) ne fait que tendre vers la significativité ($F(1;14)=3,815$; $p=.071$). L'analyse de variance montre une absence d'effet significatif de la variable expertise sur le nombre d'opérations "tirer le fil 4" (VD2), le fait qu'ils aient ou non tiré un fil (VD4), les opérations sur le cylindre 4 (VD7) et les opérations mécaniques (VD11).

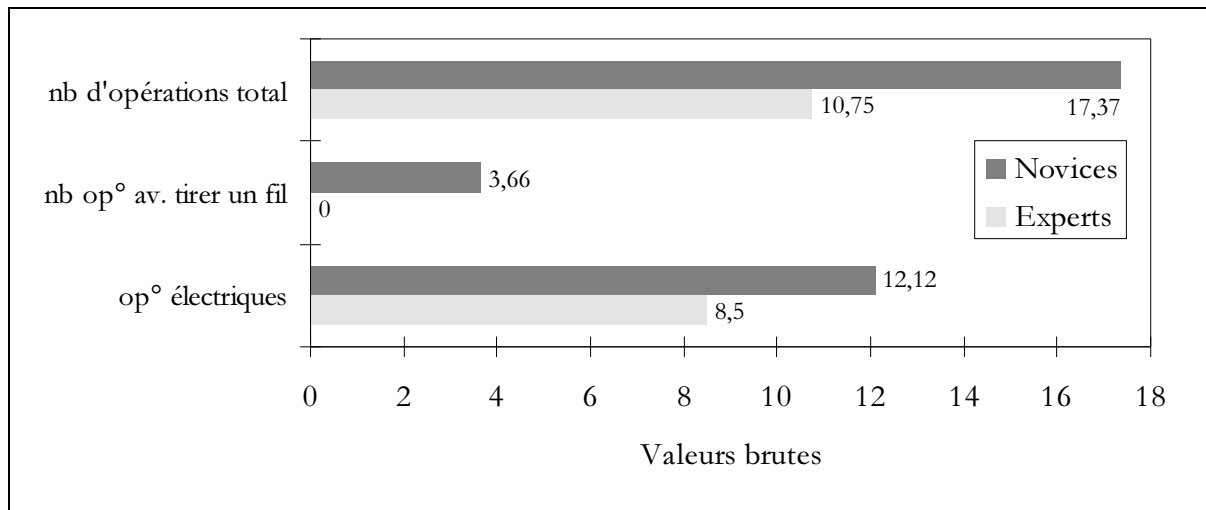


Figure 23 : Représentation graphique des résultats significatifs en valeurs brutes.

Comme le montre Figure 24, le pourcentage "tirer le fil 4" (VD3) varie en fonction de l'expertise ($F(1;14)=10,353$; $p=.006$). Proportionnellement, les experts utilisent plus ce test que les novices (19,04 *vs* 9,6). Les experts tirent un fil (VD6) plus tôt que les novices en termes de progression (0 *vs* 24%) ($F(1;12)=5,653$; $p=.034$). On note une différence significative sur le pourcentage des opérations sur le cylindre 4 (VD8) ($F(1;14)=14,665$; $p=.001$). Les experts effectuent proportionnellement plus d'opérations sur ce cylindre que les novices (34,7 *vs* 18,1). Il n'y a pas d'effet de l'expertise sur le pourcentage d'opérations électriques (VD10) et le pourcentage d'opérations mécaniques (VD12).

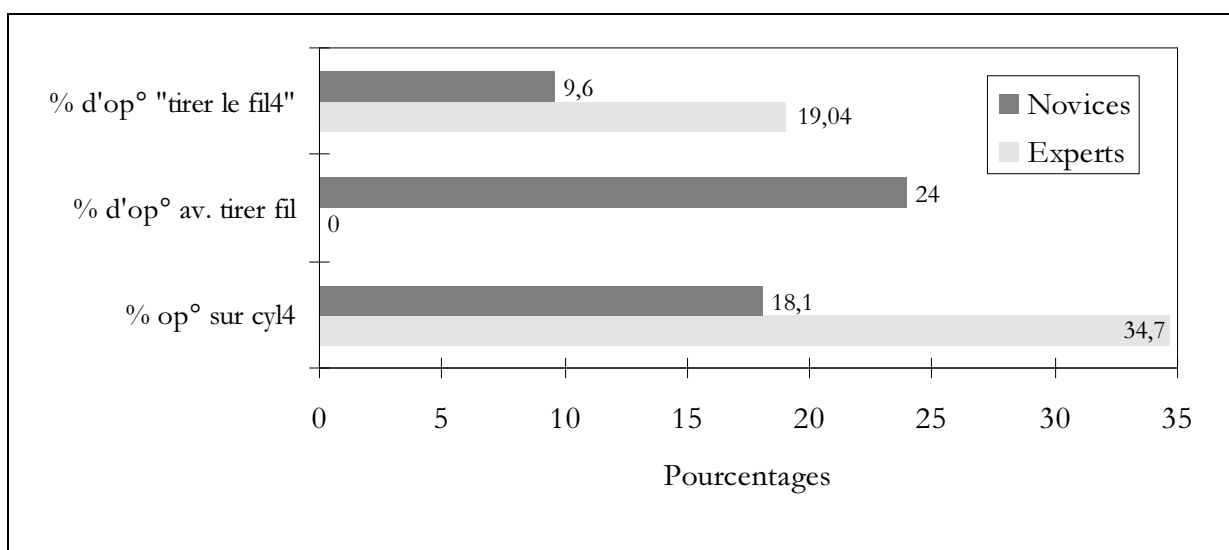


Figure 24 : Représentation graphique des résultats significatifs en pourcentages.

2.5.3 Discussion

Les experts effectuent moins d'opérations que les novices. Proportionnellement, ils tirent le fil 4 plus souvent que les novices et ils utilisent le test "tirer un fil" plus tôt dans le diagnostic. Les experts effectuent plus d'opérations sur le cylindre 4 et ont plus tendance que les novices à utiliser des opérations électriques. La discussion de ces résultats peut se faire assez directement à la lumière de l'heuristique de fréquence. Les experts mettent en œuvre des procédures qui répondent à la panne reliée le plus fréquemment aux symptômes extraits. Ces procédures concernent des tests de localisation du cylindre défaillant. Dans un premier temps, ces tests sont orientés vers la détermination de la nature mécanique ou électrique de la panne. Lorsqu'ils tirent les fils de bougies, les opérateurs localisent le cylindre défaillant en écoutant le régime du moteur. S'il ne chute pas en tirant le fil 4, c'est ce cylindre qui est défaillant. Il s'agit ensuite de savoir pourquoi ce cylindre n'explose pas. Les causes électriques peuvent être éliminées en faisant éclater l'étincelle sur la culasse, à l'extérieur du cylindre. De cette manière, les opérateurs constatent *de visu* que toute l'alimentation électrique fonctionne. Les opérations menées jusqu'ici ont permis au sujet d'éliminer une partie des causes potentielles selon une dichotomie électrique/mécanique. Ce constat a déjà été fait par Weil-Fassina et Filleur (1989) dans le cas d'un dépannage d'un système d'allumage. Les opérateurs recherchent maintenant les causes de panne dans la distribution et/ou le jeu aux soupapes. Après avoir contrôlé le jeu aux soupapes et le calage de la distribution, ils évoquent des causes de panne non directement contrôlables concernant l'étanchéité du 4^{ème} cylindre. L'élimination de ces causes potentielles implique de gros travaux de démontage (dépose de la culasse) qui n'ont pas été conduits pour des raisons strictement matérielles.

L'heuristique de fréquence est impliquée dans le choix et dans l'emplacement temporel des tests qu'effectuent les opérateurs. Les experts testent très rapidement les causes de panne électriques. De ce fait on peut déduire que les symptômes [*un cylindre n'explose pas*] trouvent souvent leur explication dans une cause électrique. La seule précocité du test "tirer les fils" permet d'appréhender la force de l'association qui lie les symptômes aux procédures chez les experts. Comme on l'a déjà dit, cette association vise à économiser des ressources et du temps de travail. Les symptômes extraits semblent reliés à des causes de panne. On retrouve ici le concept de force d'encodage (Anderson, 1993). Plus l'association entre les symptômes et la cause de panne est forte, plus le déclenchement de la procédure liée à cette cause sera privilégié. Il semble que la fréquence des causes de panne soit hiérarchisée par les opérateurs. Cette hiérarchie influe sur l'ordre des causes de panne testées.

Nous allons tenter de généraliser la discussion en essayant de voir en quoi les acquis théoriques dans les domaines du raisonnement, de l'expertise et de l'erreur permettent d'éclairer nos données. En ce qui concerne les erreurs des opérateurs, celles-ci n'ont pas été analysées dans le détail puisque l'objectif de validation du dispositif a présidé à la conception de cette expérience. Toutefois, on a pu constater lors des passations, des opérations portant sur la distribution, la carburation et la haute-tension (HT) du circuit d'allumage. Sur le plan du rendement de ces opérations, les opérateurs ont fait des choix qu'on peut qualifier de sous-optimaux. Dans le type de panne testée ici, il ne sert à rien de tester des causes de panne dans ces trois fonctions du moteur puisqu'elles ont des effets sur les 4 cylindres. Rapidement dit, la distribution, la carburation et la HT provoquent des effets en tout ou rien. Tous les cylindres en même temps sont affectés par ces trois fonctions. Si la distribution est décalée (les soupapes ne sont plus totalement fermées lorsque le piston est au point mort haut), les 4 cylindres montrent des dysfonctionnements. Il en va de même pour la carburation. Le mélange se fait en un seul endroit (le carburateur) et est distribué aux 4 cylindres. Pour ce qui est de la HT, elle arrive au 4^{ème} cylindre puisque les autres fonctionnent et que le fil qui la conduit est unique. La sous-optimalité peut se définir comme la nature d'une opération qui ne permet pas d'acquérir des informations sur la cause de la panne. C'est le cas lorsqu'un opérateur teste des composants qui sont connectés à d'autres composants générant des sorties acceptables (Rouse, Rouse & Pellegrino, 1980), comme c'est le cas ici. L'opérateur dispose de connaissances qui lui permettent d'éviter ce type d'erreur mais elles ne semblent pas être mises en œuvre.

On peut noter certaines similitudes entre cette pré-expérience et les résultats obtenus dans la pré-expérience en électronique. Ces similitudes concernent l'utilisation d'un test crucial en fonction des symptômes extraits. On se souvient que les experts électroniciens testent le CI386 tôt et souvent. Il était un élément clé dans le pattern de symptômes. On peut constater un comportement parallèle chez les mécaniciens. Tirer un fil est un test crucial dans le sens où il permet d'éliminer un grand nombre de causes de panne. C'est un apport à la compréhension de l'activité de diagnostic en tant qu'activité de résolution de problème puisqu'on pourrait conclure à une communauté de conduites inter-domaines. La fréquence des symptômes, dans les domaines techniques en tout cas, pourrait être un indice majeur de sélection des procédures à appliquer. Suite à l'évocation de ce mécanisme par Reason (1990) et à un constat similaire chez les électroniciens, il se pourrait qu'on ait ici des données empiriques à l'appui de cette théorie. Cependant, la fréquence élevée de certains symptômes fait s'écarter les experts de la cause de panne réelle. C'est dans ce cas de figure que l'on peut parler d'erreur d'expert. Le niveau des

règles est fortement impliqué puisque c'est lui qui supporte les associations mises en œuvre par les experts.

2.6 EXPERIENCE FINALE EN MECANIQUE

On va tenter ici de consolider les résultats obtenus. On a utilisé la même procédure et le même dispositif dans des conditions expérimentales plus rigoureuses. L'objectif est de répliquer mais également d'affiner les données.

2.6.1 Méthode

2.6.1.1 Sujets

Les sujets sont 9 novices et 10 experts en mécanique auto. Les experts sont des mécaniciens auto qui ont entre 15 et 24 ans d'expérience (moy=19,6 ; s=3,06). L'effectif est composé de 8 militaires de l'Atelier de Réparation de l'Armée de l'Air de Bordeaux et de l'Arsenal de Toulon et de 2 civils. Les novices sont des élèves du Bac professionnel de mécanique du lycée Mistral à Marseille qui étudient la mécanique auto depuis 2 à 4 ans.

2.6.1.2 Matériel

2.6.1.2.1 *Outils*

Les sujets disposent des mêmes outils que ceux de la pré-expérience, avec les mêmes restrictions. Les compressions du moteur ont été mesurées préalablement à l'expérience. Lorsque le sujet évoque la nécessité de mesurer les compressions du moteur et à ce moment seulement, l'expérimentateur lui tend le carton du compressiomètre (Cf. Figure 25 ci-dessous).

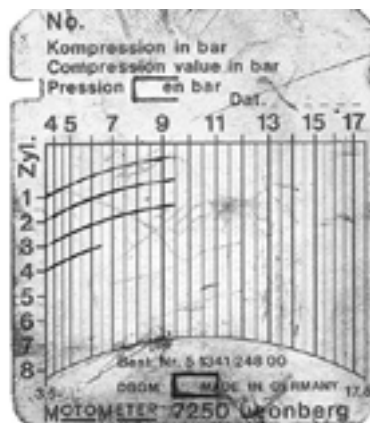


Figure 25 : Le carton du compressiomètre

2.6.1.2.2 Dispositif

Le dispositif expérimental est le même que pour la pré-expérience.

2.6.1.3 Description de la panne

La panne est la même que dans la pré-expérience. La plaque qui obture l'admission dans la pré-expérience est en aluminium. Sa couleur gris métal diffère de celle des joints (rouge). L'épaisseur de ces joints (environ 1 mm) permet de voir leur tranche et, par conséquent, leur couleur, entre la tubulure et la culasse. La différence de couleur entre le cylindre n°4 et les trois autres a servi d'indice visuel aux deux sujets de la pré-expérience qui ont trouvé la cause de la panne. Cette différence de couleur a été annulée en peignant la tranche des joints des trois premiers cylindres en gris métal. On peut objecter d'une part, que ce n'est pas la couleur d'origine des joints et que, d'autre part, la suppression de cet indice visuel complexifie le diagnostic d'une cause de panne improbable. En ce qui concerne la couleur, on peut répondre que la vie d'un moteur est émaillée de nombreuses modifications lors des entretiens qu'il subit. Par exemple, lors du changement du joint de culasse, ce qui n'est pas rare chez les moteurs de plus de 100 000 km (c'est le cas ici), il peut s'avérer nécessaire de changer les joints de la tubulure d'admission sur la culasse. Même parmi les pièces d'origine du constructeur, il arrive que les matériaux intervenant dans la fabrication d'une pièce varient au fil du temps, pour des raisons de fiabilité ou d'économie. Pour ce qui est de la complexification de la panne, il est certain que la suppression d'un indice visuel ne peut pas simplifier le processus de diagnostic. Cependant, avec un pattern de symptômes comme celui présenté par la panne (3 cylindres, compressions basses, pas de problème électrique), le diagnostic s'effectue généralement sans l'indice visuel de couleur de joints.

2.6.1.4 Consignes

L'expérience se déroule dans un atelier de mécanique. Avant la lecture des consignes, le sujet examine visuellement le moteur. Cet examen permet au sujet de reconnaître certains des organes du moteur qui sont dans une configuration inhabituelle.

Les consignes sont les mêmes que dans la pré-expérience. L'expérimentateur répond aux questions éventuelles puis enchaîne avec une consigne supplémentaire. Celle-ci a pour objectif d'inciter l'opérateur à verbaliser pendant l'exécution du dépannage. Dans la mesure où c'est une

tâche supplémentaire que le sujet doit effectuer et que ce n'est pas une pratique habituelle, on espère permettre à l'opérateur de se familiariser avec la verbalisation.

"Avant de commencer, nous allons faire un essai. Vous allez démonter un fil de bougie, puis le remonter. Tout en travaillant, vous allez décrire chaque geste pour que je puisse imaginer ce que vous faites sans avoir à vous regarder."

Il a été décidé d'ajouter cette consigne ici et pas en électronique du fait de la différence du travail en soi. Travailler sur un moteur tournant implique des efforts de desserrage, des risques de brûlure sur des points chauds, une station debout, etc. Pour ces raisons, la verbalisation n'est pas aisée. Le sujet effectue l'essai puis l'expérimentateur répond aux questions éventuelles. Lorsque le sujet est silencieux et qu'il ne procède à aucun test, l'expérimentateur relance la verbalisation. Le critère d'arrêt de l'expérience est le constat par l'opérateur de son incapacité à trouver la panne.

2.6.1.5 Procédure

Après la lecture des consignes, la tâche commence. L'intervention de l'opérateur est filmée. La passation s'arrête lorsque le sujet a trouvé la cause de la panne ou lorsqu'il abandonne. Aucun conseil ou directive n'est donné au sujet à l'exception de recommandations visant à protéger le dispositif expérimental lors d'interventions jugées maladroites.

2.6.1.6 Plan d'expérience

Le plan est $S < E_2 >$, où E est le niveau d'expérience du sujet.

2.6.1.7 Variables

2.6.1.7.1 *Variable indépendante*

Expertise à deux modalités (expert *vs* novice).

2.6.1.7.2 *Variables dépendantes*

Les variables de la pré-expérience ont été conservées. On a rajouté des mesures afin de détailler l'activité.

1/ *Temps*. C'est le temps, en minutes, qui sépare la fin des consignes de la localisation de la cause de panne ou du point d'abandon par le sujet.

- 2/ *Nombre total d'opérations.*
- 3/ *Nombre d'opérations par minute.*
- 4/ *Eléments couverts par les opérations.* Cette variable indique la diversité des éléments à partir desquels le sujet a conduit le diagnostic.
- 5/ *Pourcentage d'éléments couverts par rapport au nombre total d'opérations.* Une valeur élevée indique un nombre de répétitions bas et inversement.
- 6/ *Consultations de la revue technique.*
- 7/ *Pourcentage de consultations de la revue technique.* C'est la proportion de la variable 6 par rapport à l'ensemble des opérations.
- 8/ *Nombre de tests "tirer le fil 4".* Lorsque le moteur tourne, débrancher le fil de bougie du 4^{ème} cylindre permet de savoir si ce cylindre explose ou non. Si le régime du moteur ne chute pas lorsqu'on débranche ce fil, alors ce cylindre n'explose pas.
- 9/ *Pourcentage de tests "tirer le fil 4".* C'est la proportion de la variable 8 par rapport à l'ensemble des opérations.
- 10/ *Répétitions du test "tirer le fil 4".* Cette variable concerne les débranchements répétés du fil 4 sans qu'aucune modification (réglage, démontage, etc.) soit apportée au moteur entre chaque débranchement.
- 11/ *Pourcentage de répétitions "tirer le fil 4".* C'est la proportion de la variable 10 par rapport à l'ensemble des opérations.
- 12/ *Nombre d'opérations avant de tirer un fil.* Cette variable indique la précocité du 1^{er} test "tirer un fil".
- 13/ *Pourcentage d'opérations avant de tirer un fil.* C'est la progression (en pourcentage) du diagnostic avant le 1^{er} test "tirer un fil".
- 14/ *Tirer les fils.* Cette variable dichotomique (oui/non) indique que le sujet a ou n'a pas tiré au moins un fil de bougie lors du diagnostic.
- 15/ *Opérations sur le cylindre 4.* C'est l'ensemble des opérations électriques ou mécaniques qui portent sur ce cylindre.
- 16/ *Pourcentage d'opérations sur le cylindre 4.* C'est la proportion de la variable 15 par rapport à l'ensemble des opérations.
- 17/ *Opérations avant la 1^{ère} opération sur le cylindre 4.* Cette variable indique la précocité de la première opérations sur le cylindre 4.
- 18/ *Pourcentage d'opérations avant la 1^{ère} opération sur le cylindre 4.* C'est la progression (en pourcentage) du diagnostic avant la 1^{ère} opération sur le cylindre 4.

19/ *Opérations sous optimales.* Ces opérations sont inutiles compte tenu des symptômes. Elles comprennent :

- . la carburation (filtre à air, arrivée d'essence, gicleurs, etc.) ;
- . la distribution (virer le moteur à la main, chercher des repères sur des poulies, contrôler l'ordre d'ouverture des soupapes, etc.) ;
- . la vérification du circuit de haute tension d'allumage (capteur PMH, module HT, fil HT vers le Delco).

La carburation ne peut pas être la cause des symptômes puisque le mélange est identique pour les 4 cylindres et qu'un seul sur 4 est en dysfonctionnement. La distribution ne peut pas être la cause des symptômes car dans ce cas, il y aurait plus d'un cylindre en dysfonctionnement. La haute tension ne peut pas être la cause des symptômes puisque le fil qui conduit la haute tension du module HT vers le Delco est unique et que les bougies allument.

20/ *Pourcentage d'opérations sous optimales.* C'est la proportion de la variable 19 par rapport à l'ensemble des opérations.

21/ *Opérations sur des organes électriques.* Les organes électriques sont des éléments tels que fils de bougies, bougies. Les opérations concernant le module HT, le fil HT (par exemple) sont comptabilisées dans la variable 19.

22/ *Pourcentage d'opérations sur des organes électriques.* C'est la proportion de la variable 21 par rapport à l'ensemble des opérations.

23/ *Opérations sur des organes mécaniques.* Ce sont des opérations sur les culbuteurs, des resserrages, etc.

24/ *Pourcentage d'opérations sur des organes mécaniques.* C'est la proportion de la variable 23 par rapport à l'ensemble des opérations.

25/ *Opérations sur le carburateur.* Cette variable détaille une des composantes de la variable 19.

26/ *Pourcentage d'opérations sur le carburateur.* C'est la proportion de la variable 25 par rapport à l'ensemble des opérations.

27/ *Pourcentage d'opérations sur le carburateur par rapport au nombre d'opérations sous-optimales.*

28/ *Consultation du carton de compressiomètre.* Le taux de compression par cylindre a été mesuré avant l'expérimentation. Le compressiomètre trace sur un carton 4 courbes correspondant aux taux de compression des 4 cylindres. Pour un mécanicien, même novice, le manque de compression du cylindre 4 est évident (Cf. Figure 25).

29/ *Opérations sur la haute tension (HT).* C'est la deuxième composante des opérations sous-optimales.

30/ *Pourcentage d'opérations sur la HT.* C'est la proportion de la VD29 par rapport à l'ensemble du diagnostic.

- 31/ *Pourcentage d'opérations sur la HT par rapport à le nombre d'opérations sous-optimales.* C'est la proportion de la VD29 par rapport aux opérations sous-optimales.
- 32/ *Opérations sur la distribution.*
- 33/ *Pourcentage d'opérations sur la distribution.* Ce pourcentage permet de connaître la proportion de la VD32 par rapport à l'ensemble du diagnostic.
- 34/ *Pourcentage d'opérations sur la distribution par rapport au nombre d'opérations sous-optimales.* C'est la VD32 par rapport aux opérations sous-optimales.

2.6.1.8 Prédictions

On maintient ici les hypothèses centrales défendues lors de la pré-expérience. Dans la mesure où les experts travaillent selon des règles d'économie, on s'attend à ce qu'ils testent un nombre réduit de composants du moteur. On prédit qu'ils vont tirer les fils plus souvent que les novices et que le pourcentage de ce test sur le nombre total opérations sera plus important. Le nombre d'opérations avant de tirer un fil de bougie et son pourcentage devraient être très bas chez les experts puisque c'est un moyen de recueillir des informations importantes vis-à-vis des symptômes. Puisque c'est le cylindre 4 qui présente des symptômes anormaux et puisqu'on pense qu'ils sont soumis à un biais, les experts devraient effectuer un plus grand nombre d'opérations sur ce cylindre que les novices et le pourcentage de ces opérations devrait être plus grand chez eux. Les causes pour lesquelles un cylindre n'explose pas sont le plus souvent électriques. Conformément à notre hypothèse théorique d'un biais de fréquence, les experts devraient effectuer plus d'opérations électriques que les novices et le pourcentage de ces opérations devrait être plus important chez eux. On pense que les experts effectueront globalement moins d'opérations sous-optimales que les novices du fait de leur meilleure connaissance du fonctionnement du moteur.

2.6.2 Résultats

Tableau 4 : Table des moyennes des résultats significatifs

VD	Intitulé	VI	moy.	s	p
4	éléments couverts par les opérations	experts	10	5,228	.08
		novices	14,66	5,701	
16	% d'opérations sur le cylindre 4	experts	41,01	20	.026
		novices	22,78	10,8	
28	consultation du carton de compressiomètre (en % de <i>n</i>)	experts	70	48,3	.038
		novices	22,22	44,1	

La table des données figure en Annexe 7.4.4. L'analyse de variance montre peu de résultats significatifs. On note une tendance sur les *éléments couverts par les opérations* (VD4) (experts=10 ; novices=14,66) ($F(1;17)=3,465$; $p=.08$). On relève des effets plus nets sur le *pourcentage d'opérations sur le cylindre 4* (VD16) (experts=41,01% ; novices=22,78%) ($F(1;17)=5,917$; $p=.026$) et sur la *consultation du carton de compressiomètre* (VD28) (experts=70 ; novices=22,22) ($F(1;17)=5,028$; $p=.038$). Aucun sujet n'a trouvé la cause de la panne, que ce soit chez les experts ou les novices. Toutes les autres variables dépendantes ne montrent aucune différence significative entre les deux groupes de sujets. L'ensemble des tables d'analyse de variance figure en Annexe 7.3. La Figure 26 donne une représentation graphique des résultats.

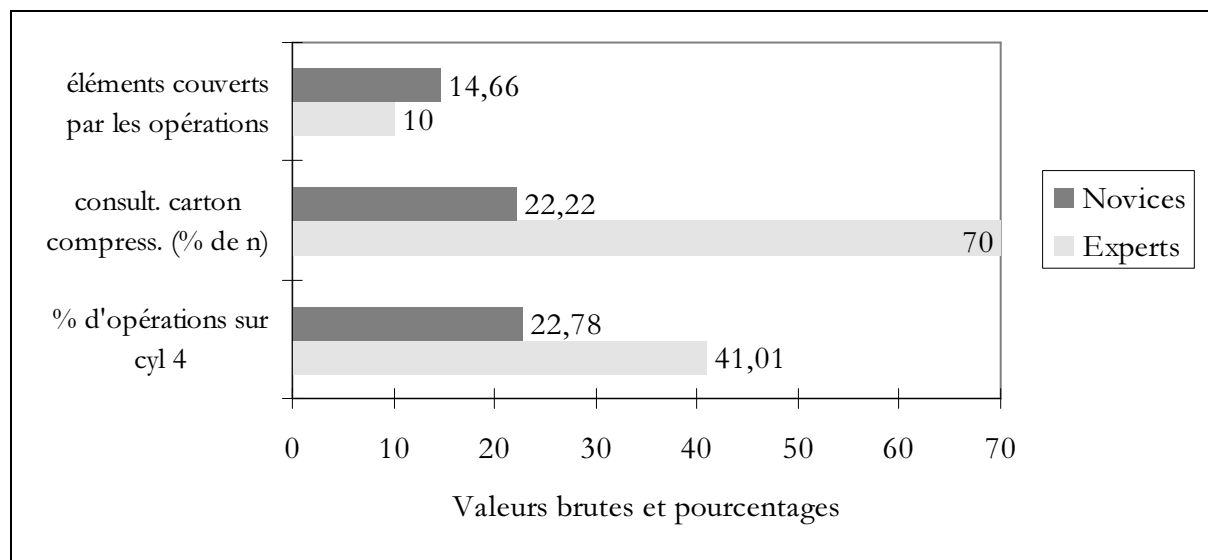


Figure 26 : Représentation graphique des résultats significatifs

2.6.3 Discussion

Dans l'ensemble, experts et novices développent le même type de tests et les mettent en œuvre au mêmes phases du diagnostic. Cependant, les résultats significatifs soutiennent l'hypothèse théorique de la fréquence comme indice de déclenchement des procédures du diagnostic chez les experts. Ces sujets utilisent une moins grande diversité de tests pour rechercher la panne, ils effectuent (proportionnellement) plus d'opérations sur le 4^{ème} cylindre et ils sont plus nombreux à consulter le carton du compressiomètre. Ces trois résultats tendent à conforter l'idée que les experts maintiennent des hypothèses de travail centrées sur un nombre de causes possibles plus réduit que les novices.

Un des points importants est que les experts, tout comme les novices s'appuient fortement sur les traits de surface, contrairement à l'avis de certains auteurs. (Hardiman *et al.*, 1989 ; Smith, 1992 ; Zajkowski & Martin, 1993). Ils les utilisent pour récupérer des procédures de test connues auxquelles ils ont recours dans des cas similaires au cas présent. Les opérateurs ont des difficultés à évoquer des causes de panne autres que celles qu'ils ont l'habitude de rencontrer. La force des associations symptômes-causes lors de la construction de l'expertise guide l'évocation des hypothèses et la récupération d'un plan de test. Cette force d'association ne semble concerner que les données de surface puisque la panne inconnue qui a été créée est traitée comme une panne connue. Les effets possibles de ce type d'erreur dans une situation dynamique industrielle seront discutés dans la dernière partie du document (Cf. 3 Accidents des transports et catastrophes industrielles).

Lorsque les sujets démarrent le diagnostic, ils tentent de déterminer la nature de la panne (électrique ou mécanique). Le diagnostic commence par un split-half composé de plusieurs tests. Contrairement à l'électronique, ce split-half n'est pas topographique mais fonctionnel. Il ne s'agit pas d'isoler la cause de panne dans une zone physique du moteur mais dans une de ses fonctions (électrique *vs* mécanique). Une fois les causes électriques écartées, les sujets testent les causes mécaniques. La partie mécanique du diagnostic ne peut pas se dérouler *in extenso* dans la mesure où certaines pièces du moteur ne sont accessibles qu'après un démontage important (dépose de la culasse ou dépose bielle-piston). Cela amène les sujets à émettre certaines hypothèses qu'il ne peuvent tester. Ces hypothèses concernent les soupapes, le piston et les segments. Dans une situation d'atelier où l'objectif est la réparation, la dépose de la culasse permet à coup sûr de trouver la plaque sur l'admission du 4^{ème} cylindre dans la mesure où les tubulures elles-mêmes sont déposées.

Sur le plan des connaissances mises en œuvre, on remarque que le diagnostic commence par le test des causes fréquentes (bougie, fil de bougie). Aux dires des opérateurs eux-mêmes, la seule fréquence de panne ne guide pas l'ordre dans lequel les tests sont menés. La rapidité du test, déterminée par sa durée intrinsèque mais également par l'accessibilité des composants sur lesquels il porte, est également prise en compte. C'est la combinaison du facteur fréquence et du facteur rapidité qui oriente les premiers tests vers les éléments électriques du moteur.

Les opérateurs évoquent certaines hypothèses non compatibles avec les symptômes. C'est le cas des opérations qui portent sur la carburation, la haute tension et la distribution. Ces hypothèses sont caractérisées par leur position dans le diagnostic (elles sont produites en dernier) ainsi que par leur évocation (lente et accompagnée de silences). Dans un premier temps, les opérateurs associent le comportement du moteur aux causes potentielles les plus fréquentes. Ils récupèrent une série d'hypothèses fréquentes compatibles avec les symptômes. C'est un raisonnement de diagnostic basé sur des règles d'association (Rasmussen, 1986) dans lequel il n'existe pas de recherche à proprement parler. Dans un deuxième temps, lorsque l'opérateur a testé les hypothèses les plus probables et que la cause de la panne n'a pas été découverte, le diagnostic s'oriente vers des causes potentielles très improbables et pour lesquelles les verbalisations de l'opérateur suggèrent une simulation mentale : *"Ca pourrait être X mais non, ce n'est pas possible parce qu'on n'aurait pas Y"*. L'improbabilité de ces causes de panne et le fait qu'elles semblent faire l'objet d'une simulation incite à croire à un mode de raisonnement basé sur un niveau autre que celui des règles. Les opérateurs qui formulent ces hypothèses recourent aux principes de fonctionnement du moteur pour les tester mentalement. Le passage d'une catégorie d'hypothèses à une autre semble marquer une transition depuis le niveau des règles vers un raisonnement basé plutôt sur les connaissances.

Le diagnostic du type de panne étudié ici met en œuvre la récupération et le déroulement d'un plan. Il est activé par les symptômes extraits et composé des deux groupes de tests dont il a été question plus haut (tests électriques et tests mécaniques). Sa sélection et sa mise en œuvre sont dirigées par les symptômes. C'est leur configuration qui détermine l'orientation du diagnostic. De ce point de vue, l'extraction des symptômes conditionne le diagnostic. Si l'opérateur ne détecte pas que le moteur tourne sur trois cylindres, le diagnostic risque de s'orienter vers une recherche de réglages plutôt que vers la recherche d'une cause de panne franche. L'identification des symptômes présentés par le moteur implique que ceux-ci ont déjà été rencontrés. C'est une reconnaissance. Comme souvent en mécanique, elle repose en grande partie sur l'écoute du moteur. Le bruit guide l'opérateur dans son diagnostic et cela se vérifie pour un grand nombre de situations de panne où des pièces mécaniques sont en mouvement. Dans le cas de notre panne, les opérateurs qui entendent le moteur tourner sur trois cylindres tentent parfois

de trouver un symptôme convergent supplémentaire par l'observation des gaz d'échappement. Le moteur ne produit pas de fumée bleue, ce qui n'a pas empêché les opérateurs de poser une hypothèse de cylindre manquant. L'observation de la couleur des gaz d'échappement, dans le cas de cette panne, n'aurait donc qu'un rôle de soutien. Les symptômes principaux semblent concerner la vibration et le bruit.

2.7 CONCLUSION DES PASSATIONS EN MECANIQUE

Les pannes les plus difficiles sont celles qui invalident les présupposés normalement faits par l'opérateur (Patrick, 1993). La difficulté causée par la panne étudiée repose sur la remise en cause de l'hypothèse la plus fréquente. Dans l'expérience finale, aucun des sujets n'a trouvé la cause de la panne. La fréquence d'occurrence des pannes semble être l'indice à partir duquel l'ensemble des causes potentielles à tester est récupéré. Tout comme dans la pré-expérience, experts et novices effectuent des opérations sous-optimales. Ce type d'erreur est peut-être lié à une recherche de panne moins probabiliste une fois les causes fréquentes épuisées. Ce type d'opérations met en lumière le fait que les sujets effectuent des actes que leurs propres connaissances devraient suffire à rejeter. Peut-être faut-il voir dans les opérations sous-optimales une stratégie de diagnostic qui a épuisé les causes fréquentes et qui repose sur des opérations liées topographiquement ou fonctionnellement aux précédentes. Dans le cas des opérations sur la haute tension, le sujet, après avoir tiré les fils de bougies et constaté que seul le 4^{ème} cylindre n'explosait pas, remonte un étage plus en amont. Ici, le lien est à la fois physique (la HT et les fils de bougies sont reliés directement) et fonctionnel (le même flux électrique d'allumage est transporté par les deux sous-systèmes). Pour finir sur ce point, les opérateurs effectuent des opérations en amont des tests optimaux à la recherche d'un dysfonctionnement éventuel, même si les symptômes sont incompatibles avec ces tests.

Dans un cas de panne où les tests routiniers ne peuvent mener à l'identification de la cause, les mécaniciens ont recours à la dépose. En l'occurrence, lorsqu'un moteur montre des problèmes de compression et que les causes premières ont déjà été testées, les opérateurs déposent la culasse et continuent le diagnostic sur les pistons, les segments et les soupapes. Si cette dépose était permise dans les expériences, les sujets trouveraient la plaque qui obstrue l'admission. Cependant, les cas d'obstruction sont rares et le démontage d'une tubulure est peu fréquent.

Sur le plan stratégique, on constate que le raisonnement n'est pas topographique. Les opérateurs ne suivent pas le circuit d'admission pour trouver la panne. La plupart du temps, lorsque les causes premières ont été écartées, les symptômes s'expliquent par un problème d'étanchéité du cylindre. Cette cause se situe en aval de la tubulure d'admission. Le chaînage avant, depuis le carburateur vers la chambre de combustion ne fait donc pas partie des tests utilisés pour ce genre de panne. Les experts délaissent le raisonnement topographique car le raisonnement probabiliste est souvent plus rentable. Au fur et à mesure de l'acquisition de

l'expertise, les probabilités intuitives sont préférées aux autres connaissances, au moins dans un premier temps. Les opérateurs n'ont recours à des raisonnements autres que l'appariement qu'une fois que les associations [symptômes-panne] sont épuisées. Mais même dans ce cas, ce recours n'est pas systématique. Dans le cas de la panne étudiée ici, la confiance accordée à l'hypothèse d'un problème d'étanchéité du cylindre est suffisamment forte pour empêcher le recours à une autre stratégie de recherche.

Les opérateurs, particulièrement les experts, ont les connaissances nécessaires pour trouver la panne. Le fait qu'ils ne parviennent pas à la localiser révèle la nature des connaissances qu'ils mettent en œuvre. Ces connaissances sont très différentes des données physiques et des lois de mécanique qui sous-tendent le fonctionnement d'un moteur. Elles relèvent plutôt d'une organisation fonctionnelle, d'une structuration autour de l'action qui ne permet pas la mise en place d'un raisonnement analytique. Cette organisation témoigne d'une transformation du savoir au cours des années de pratique. Les procédures utilisées évacuent l'aspect déclaratif de la connaissance, même si celle-ci peut être récupérée et utilisée en dehors du contexte de l'action.

2.8 DISCUSSION GENERALE

L'hypothèse théorique pose que le mode automatisé est celui dans lequel sont commises les erreurs d'experts dans le diagnostic. Les données recueillies sur les expériences semblent soutenir cette proposition. L'hypothèse théorique prétend également que ces erreurs sont indépendantes du domaine d'activité. On a pu constater que les experts en électronique et en mécanique sont soumis aux mêmes biais de fréquence. On a pu observer des comportements similaires dans les deux domaines d'activité.

Les experts fonderaient la résolution de problème sur des traits de structure, contrairement aux novices qui s'attacheraient aux traits de surface (Hardiman *et al.*, 1989 ; Smith, 1992 ; Zajkowski & Martin, 1993). Il semble que la dichotomie soit excessive. Les résultats de ce travail montrent que les experts fondent eux aussi leur raisonnement sur des traits de surface qui servent d'activateurs pour déclencher des traitements automatisés. La distinction traits de surface/traits de structure n'est pas critiquée ici. Ce qui l'est, c'est l'attribution de l'un des deux niveaux d'information à un unique niveau d'expertise. Experts et novices utilisent les traits de surface. La différence repose sur l'usage différent qu'ils en font.

C'est probablement un ensemble de règles qui sous-tend le diagnostic expert dans nos expériences. Ce niveau de performance suppose l'association d'un état à une solution par une règle du type [Si ➔ Alors] (Helfrich, 1999). Rasmussen (1986) réserve le niveau des automatismes à des activités conduites sans contrôle, essentiellement sensori-motrices. Les associations automatisées, telles qu'elles ont été mentionnées dans ce travail, n'impliquent donc pas le niveau des automatismes puisque l'activité est réalisée sous un certain contrôle attentionnel et qu'elle dépasse largement le niveau sensori-moteur. On peut dire que d'une certaine manière, la performance de diagnostic experte se résume à une mise en œuvre de règles d'association dont les indices de déclenchement sont identifiés par les connaissances préalables de l'opérateur. La règle d'association qui lie les indices situationnels à la procédure est probablement sous-tendue par un schéma (Figure 27, p. 156). Cette formalisation permet de rendre compte des résultats et permet également de faire se rejoindre le formalisme des raccourcis de Rasmussen et la théorie des schémas.

Les indices de surface jouent un rôle important dans le diagnostic expert. Pour Rasmussen (1986), ces indices de surface activent des procédures. La résolution de problème experte se bornerait donc à un appariement entre des données environnementales et des solutions mémorisées inséré dans une représentation fonctionnelle du système (Janzen & Vicente,

1998). Cependant, on peut se questionner sur le support de cet appariement. L'activation directe entre données et procédures peut être écartée. Les sujets appariant des symptômes avec les procédures et non pas des informations brutes. Tous les symptômes sont des informations mais toutes les informations ne sont pas des symptômes. Autrement dit, l'expert procède à un traitement, une sélection de ces informations. Ce tri est forcément guidé par une connaissance quelconque puisque la reconnaissance d'une information en tant que symptôme suppose qu'elle est raccrochée à un critère de sélection, lui-même lié à l'objectif de la tâche en cours. Le schéma est un bon candidat pour supporter les associations expertes et l'idée n'est pas tout à fait nouvelle (Cf. Bollon & Channouf, 1993).

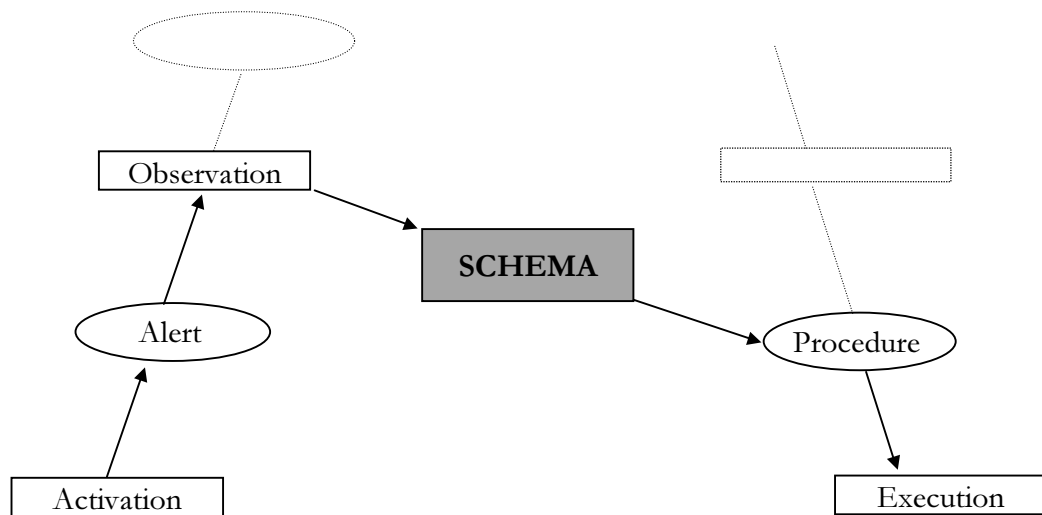


Figure 27 : Proposition d'intégration du schéma dans les raccourcis du modèle Rasmussen

Cette conception permet de continuer à rendre compte du fonctionnement expert et de faire se rejoindre deux formalisations de l'expertise. Si on se réfère à la conception du schéma selon Reason (1990), celui-ci se déclenche à partir d'activateurs, contient des connaissances instanciables et produit (dans le cas du schéma d'action) des actions. Cette triade [entrée-connaissances-sortie] peut se substituer à la terminologie de Rasmussen [indice-raccourci-action] avec l'avantage de pouvoir soutenir conceptuellement le raccourci par une structure.

A l'aide des résultats recueillis dans cette thèse et au vu de ce que permettent d'expliquer des notions telles que le raisonnement probabiliste, la théorie des schémas et le raisonnement par analogie, on peut penser que ce qui a été dit du système cognitif humain en tant que machine à inférer doit être partiellement abandonné. La cognition située impose de faire face à des

impératifs de temps, de rendement et d'économie. Pour ces raisons au moins, les inférences ne sont pas l'unique outil de raisonnement et il s'en faut de beaucoup. La position adoptée ici pose que le raisonnement situé repose avant tout sur des appariements guidés - entre autres - par la fréquence. La récupération est, dans cette optique, le fer de lance du raisonnement en situation. La question récurrente pour le sujet est : "La plupart du temps, quelle est l'action qui donne les meilleurs résultats dans cette situation ?" Ce qu'on a appelé jusqu'ici dans cette thèse raisonnement d'expert n'est peut-être rien d'autre que de l'appariement, processus duquel les inférences sont largement exclues. Dans le cas des novices, la résolution d'un problème commence par une récupération d'indices afin d'activer des connaissances jugées pertinentes. Dans un deuxième temps, après que les solutions disponibles sont épuisées, on suppose que la recherche en mémoire est abandonnée. C'est alors qu'interviendraient des processus inférentiels pour résoudre le cas. Cependant, on ne peut rejeter l'idée que le sujet, expert ou novice, pourrait continuer à chercher des solutions dans des connaissances qu'il a dans d'autres domaines. On se trouverait alors dans un raisonnement par analogie au sens traditionnel du terme où la solution du problème en cours est adaptée à partir de celle adoptée pour un problème analogue, fût-ce d'un domaine très différent.

Tous les sujets étudiés sont capables de déduire les effets d'une cause de panne. Si on leur demande (ce qui a été fait de manière informelle) de prédire les symptômes du système à partir de la panne qu'on se propose d'implémenter, les sujets énoncent des symptômes qui appartiennent au pattern présenté par le système. Lorsqu'ils doivent raisonner dans l'autre sens, c'est à dire découvrir la cause à partir des symptômes, les opérateurs éprouvent des difficultés. Dans le premier cas, il s'agit, par une simulation et un chaînage avant, de se représenter l'état futur du système. C'est une situation de pronostic. Dans le deuxième cas, il s'agit de faire converger des indices vers une cause potentielle. C'est le diagnostic. Dans ce dernier cas, le fait que le sujet ait à sélectionner de l'information dans un ensemble vaste explique une partie de la différence et on a vu que des biais peuvent menacer la pertinence du processus d'extraction.

3. ACCIDENTS DES TRANSPORTS ET CATASTROPHES **INDUSTRIELLES**

L'orientation qui a été donnée à cette recherche est ergonomique. On s'est intéressé à étudier l'opérateur au travail, ses modes de raisonnements et ses erreurs. Même si les conditions du travail des sujets étaient celles du travail réel, notre étude a revêtu jusqu'à présent un caractère expérimental. Il s'agit maintenant de discuter les résultats obtenus au travers de situations naturelles. A l'origine de cette motivation se trouve l'ouvrage incontournable de James Reason (1990) : *L'erreur humaine*. On essaiera de s'inspirer de la démarche de Reason pour observer les faits sous l'angle de la théorie et démontrer par la même occasion la pertinence de certaines données psychologiques. La partie qui suit se propose d'explorer certains événements industriels et des transports et d'analyser les erreurs commises.

"L'analyse des accidents conduit inévitablement à l'analyse du travail. La reconstitution de la genèse d'un dommage n'est interprétable que replacée dans le contexte d'une situation suffisamment large pour y retrouver des conditions essentielles. Cette constatation est particulièrement vraie pour les situations de travail. Leur prise en compte précise, sous les angles techniques, organisationnels et humains s'impose pour identifier les conditions de la survenue d'un accident du travail" (Cuny, 1993, p. 233-234).

D'après une étude menée dans le secteur des scieries par Laflamme et Cloutier (1991), les accidents qui surviennent dans une chaîne de production ne sont pas distribués de manière aléatoire. Les blessures et accidents sont spécifiques aux machines et les facteurs qui influencent la survenue de l'accident sont étroitement liés les uns aux autres. L'organisation de l'accident en chaîne causale et la spécificité des erreurs à l'objet ou à la situation auquel elles se rapportent se vérifient en partie dans les accidents qui vont être présentés ici. L'exposé traite de quelques accidents des transports ou industriels dont la fréquence ou la gravité imposent une analyse multifactorielle. L'exhaustivité n'étant pas notre objectif, le point de vue adopté ici sera ergonomique. On essaiera de montrer les implications de certaines caractéristiques du fonctionnement cognitif humain dans l'occurrence de ces accidents. Certains des accidents rapportés ici concernent le diagnostic et la prise de décision individuels. Les processus engagés

dans ces accidents sont essentiellement cognitifs et concernent des erreurs d'agents situés en interaction directe avec la situation.

Les erreurs commises lors de ces accidents sont très diverses et on verra qu'à divers degrés, le diagnostic est souvent impliqué, que ce soit en tant qu'outil d'interprétation de symptômes, en tant qu'instrument de prédiction dans une activité d'anticipation ou encore en tant que composante du processus de prise de décision.

3.1.1 Les niveaux de traitement dans les accidents de la route

Il existe un consensus autour de la relation entre vitesse et accidents de la route (West, French, Kemp & Elander, 1993 ; French, West, Elander & Wilding, 1993 ; Blockey & Hartley, 1995). Ce lien est sans doute indirect dans la mesure où c'est le manque de distance de freinage ou le manque de temps pour réagir, eux-mêmes liés à la vitesse (directement, cette fois), qui conditionnent la survenue de l'accident dans le cas d'un événement routier inattendu. Certains facteurs s'ajoutent à ceux déjà mentionnés en tant que générateurs d'accidents (certains médicaments, l'alcool ou encore le téléphone (Brookhuis, De Waard & Mulder, 1994)). D'autres facteurs peuvent au contraire diminuer ces risques (un dispositif d'accélération d'allumage des feux stop, par exemple (Sivak & Flannagan, 1993)).

Aberg et Rimmö (1998) s'appuient sur la terminologie de Reason (1990) pour étayer théoriquement l'étude des accidents. Pour ces auteurs, il semble que la plupart des actes dangereux qui créent des accidents de circulation sont reliés à des erreurs basées sur les automatismes et les règles car la plupart des tâches de conduite sont effectuées à ces niveaux. A cette composante cognitive de l'accident s'ajoute le facteur [*type de conducteur*] qui détermine en partie le type d'erreur commise. Aberg et Rimmö (1998) notent que ce sont les jeunes conducteurs, les hommes, les conducteurs à fort kilométrage et les conducteurs pressés qui commettent plus de violations. Les erreurs d'inattention augmentent avec l'âge, sans distinction de sexe. Enfin, les femmes et les conducteurs à faible kilométrage commettent plus d'erreurs d'inexpérience. La conduite automobile ne relève pas uniquement d'une activité cognitive. C'est aussi une situation à forte composante sociale dans laquelle le comportement général de l'individu et ses styles de prise de décision sont transposés au volant. Cette transposition génère des violations (excès de vitesse, dépassement dangereux, etc.) qui à leur tour potentialisent les effets d'une erreur. Des facteurs personnologiques (Lawton & Parker, 1998) et psychosociaux (Helfrich, 1999) sont probablement à l'origine de la plus forte proportion de jeunes hommes impliqués dans

des comportements aberrants à l'origine d'accidents (French, West, Elander & Wilding, 1993 ; Blockey & Hartley, 1995 ; Parker, Reason, Manstead & Stradling, 1995 ; Aberg & Rimmö, 1998).

En conduite automobile, le comportement du conducteur est routinier et ne relève pas d'une évaluation des risques encourus dans tel ou tel type de situation. La plupart du temps, les automobilistes ne seraient pas en mesure de s'arrêter à un carrefour si un piéton s'engageait sur la chaussée (Wagenaar, 1990). Cette conduite peut paraître dangereuse. Cependant, le comportement des conducteurs s'ajuste aux régularités détectées dans l'environnement. La plupart du temps, un piéton attend que le trafic diminue plutôt que de traverser au milieu d'un flot de circulation ou dans un carrefour. L'adaptation de la conduite s'oriente vers l'adoption d'une sécurité minimum, en l'occurrence une possibilité d'évitement. Ce style de conduite, comme l'ensemble des comportements des automobilistes repose en grande partie sur les automatismes. L'activité de conduite serait impossible à mener s'il fallait évaluer sans cesse les risques encourus. On peut croire (sur la base des données statistiques de Wagenaar, 1990, par exemple) que le mode automatique délaisse la prise en compte du risque pour privilégier l'économie des ressources. Celles-ci peuvent alors être allouées à la détermination d'une stratégie générale de conduite, le choix d'un itinéraire, etc., sans permettre l'arrêt complet du véhicule si la situation l'imposait. Dans la conduite automobile, le mode automatique inclut une prise de risque implicite. L'adéquation entre les attentes que le conducteur a pu induire de son environnement avant qu'une difficulté n'apparaisse et la situation effective à laquelle il est confronté peut conduire à un accident (Fleury, 1992).

La conduite automobile se déroule dans un environnement complexe (le réseau routier) du fait du trafic et de la présence de particularités signalétiques et topologiques. La prévention des accidents passe par l'étude du comportement de l'automobiliste mais également par l'étude a priori et a posteriori des zones à risques. Les outils employés varient depuis des méthodes de fréquence pondérées par la gravité, le coût ou l'exposition au risque, en passant par l'observation des éléments dangereux du réseau jusqu'à des méthodes prédictives reposant sur des modèles statistiques (Vandermissen, Pouliot & Morin, 1996) ou causaux (Brenac & Megherbi, 1996).

Les accidents de la route sont un des domaines pour lesquels l'analyse de l'activité de l'opérateur permet de comprendre certains aspects du fonctionnement cognitif. L'effet de l'expérience, par exemple, va sans doute dans le sens de l'acquisition d'une conduite plus sûre. Mais certaines configurations routières peuvent constituer des obstacles pour les conducteurs expérimentés. Les carrefours giratoires à priorité à droite (qui tendent toutefois à disparaître) peuvent être traités comme des ronds-points classiques à priorité à gauche, beaucoup plus fréquents. La fréquence d'occurrence de certaines configurations et les indices qui permettent de les catégoriser sont sans doute à l'origine d'accidents. Si on conçoit que la conduite est une

activité en grande partie réactive, les indices présents dans le milieu et leur traitement sous-tendent l'ensemble de l'activité. Tout comme les symptômes permettent à l'expert en diagnostic de catégoriser la panne et d'activer une solution, la sélection et le traitement des informations environnementales permet au conducteur de déclencher des procédures adaptées. L'appariement d'un pattern d'indices situationnels à une procédure constitue probablement l'essentiel de l'activité de la conduite experte.

A la différence du pilotage d'avions, la conduite automobile est un processus qui peut être stoppé quasiment à tout moment, dans un laps de temps court. Le conducteur est impliqué dans un processus continu mais il peut décider de la rapidité de son évolution. Le pilote est contraint de s'adapter au processus et notamment à sa rapidité d'évolution. Les effets de certains automatismes de la part de l'opérateur combinés à la charge induite par l'évolutivité du processus continu sont un frein à la récupération de certaines erreurs.

3.1.2 Les accidents aériens

Les accidents aériens occupent une place importante dans l'analyse des catastrophes qui est faite ici. Les rapports sont faciles d'accès (pour ceux qui sont cités ici, en tout cas) et ils constituent un élément clé de la sécurité du transport aérien (Chappell, 1994). La facilité d'accès trouve sa raison d'être dans l'intérêt des compagnies aériennes d'une part et dans la préoccupation des organismes publics chargés de la sécurité du transport aérien d'autre part, de rendre ce moyen de transport plus sûr. De cette volonté découle une démarche d'approfondissement des causes de chaque occurrence d'accident. *"Il est important, pour la communauté aéronautique, de déterminer le plus rapidement possible ce qui a pu conduire à la catastrophe, d'en tirer les leçons et d'agir à tous les niveaux et dans tous les domaines pour éviter que les mêmes causes produisent les mêmes effets, si les causes elles-mêmes ne peuvent pas être totalement éliminées"* (Benoist, 1995). En termes de recueil de données, cette politique s'est accompagnée de l'apparition de DFDR (*digital flight data recorder* : la "boîte noire") et de CVR (*cockpit voice recorder*). Ces appareils enregistrent respectivement les paramètres du vol sur les 25 dernières heures et les conversations dans le cockpit. Ces instruments participent à ce que Perrard et Martegoutte (1995) appellent l'analyse des vols.

Face au caractère souvent grave des accidents d'avion, la réponse des différentes organisations nationales en charge de la régulation et de l'administration du transport aérien a consisté à mettre sur pied des enquêtes très poussées, étayées par l'exploitation de divers domaines pratiques et théoriques (avionique, facteur humain, simulation assistée par ordinateur, etc.) susceptibles d'éclairer la recherche de la cause des accidents. Ces enquêtes-accident font

l'objet d'une diffusion publique et informent en retour les compagnies aériennes et les constructeurs sur les causes de l'accident (Rame, 1995). Les événements recherchés ne sont pas uniquement ceux qui ont entraîné des conséquences graves mais également ceux capables de révéler un point de vulnérabilité à un risque identifié (De Courville, 1997). La finalité des enquêtes s'inscrit dans une démarche de fiabilité visant à réduire le taux d'accidents. Si celui-ci ne baisse pas, compte tenu de l'augmentation prévisible du trafic, on peut s'attendre à un accident aérien grave tous les 8 jours en 2003 (Gendre, 1995). Afin de maîtriser le nombre d'accidents, la nécessité d'un feed-back sous la forme d'un retour d'expérience a vite été reconnue (Arslanian, 1995) et intégrée à une politique générale de prévention active (De Courville, 1997). A cela se sont ajoutés des plans de formation en facteurs humains visant à éclairer les pilotes sur leurs propres modes de fonctionnement et de dysfonctionnement (De Courville, 1994 ; Amalberti, De Courville, Dentan, Gervais, Labrucherie & Pariès, 1996).

Les accidents dans le domaine de l'aviation se prêtent bien à une analyse en termes d'erreur humaine (Gerdsmeyr, Ladkin & Loer, 1997) et le fait que les opérateurs ont un rôle clé dans les situations d'urgence n'y est sans doute pas étranger. A cela s'ajoute la tendance qu'ont les pilotes à surestimer leurs compétences et à sous-estimer les risques que leurs actions impliquent (O'Hare, 1990). Les compagnies aériennes forment depuis plusieurs années les pilotes à la prise en compte des facteurs humains. De plus, le pilotage est une activité très complexe, soumise à de fortes contraintes organisationnelles, temporelles et de sécurité. La réunion de ces facteurs justifie qu'on s'intéresse à l'activité de pilotage, particulièrement quand l'objectif de sécurité est de diminuer le nombre d'accidents dans un trafic à volume croissant.

3.1.2.1 La représentation de la situation

De l'ensemble des accidents aériens retenus pour cette thèse, on peut dégager une constante : la non prise en compte de certains paramètres importants de la situation. En termes psychologiques, la représentation que l'opérateur a de la situation est erronée. Il effectue des actions qui peuvent être correctes elles-mêmes mais qui, du fait de conditions de réalisation particulières, constituent des erreurs. Ce comportement a déjà été relevé (Air Inter, 1995b) et serait lié à l'absence de remise en cause d'un schéma installé. On va donner quelques exemples de ce qu'on entend par représentation erronée au travers de quelques occurrences d'accidents.

Le 14 Avril 1994, un Swearingen SA226 Merlin approche de Sydney, Nova Scotia. Bien que l'altitude et la vitesse de l'avion soient excessives, l'équipage décide de maintenir l'approche. D'après le rapport d'accident (*Transportation Safety Board of Canada*, 1995) cette décision implique d'effectuer des virages afin de corriger la trajectoire, de perdre beaucoup d'altitude en peu de

temps (4300 pieds/mn) et de faire baisser la vitesse. Tous ces objectifs, poursuivis dans les contraintes de temps inhérentes à une approche, ont conduit à une représentation erronée de la position de l'avion. L'équipage du SA226 est descendu jusqu'à 150 pieds (45m) d'altitude (alors que l'altitude minimale est de 600 pieds (180m)) sans avoir conscience de la trajectoire verticale. Il a frôlé un bâtiment à 50 pieds (15m). L'incident n'a causé aucune victime.

Le 16 Septembre 1995, un Metro III (Cf. Figure 28) effectue un exercice de décollage asymétrique de nuit à Tamworth, New South Wales (*Bureau of Air Safety Investigation*, 1997).



Figure 28 : Un Metro III

Cet exercice consiste à couper un moteur au décollage et à reposer l'avion. Lorsque la coupure se produit accidentellement, l'avion met automatiquement les pales des hélices en drapeau afin de limiter la trainée et d'optimiser la prise d'altitude. Le pilote instructeur a simulé la coupure du moteur en réduisant sa puissance. Ce mode de réduction de puissance ne permet pas aux pales d'hélices de se mettre en drapeau. En conséquence, l'avion n'a pas pu prendre de l'altitude. Aucun des deux pilotes ne s'en est rendu compte à temps. L'exercice aurait dû être abandonné. Le pilote instructeur a fait remarquer au pilote aux commandes que l'avion perdait de l'altitude 2 secondes seulement avant le crash. L'accident a causé la mort des trois occupants de l'appareil.

Le 20 Décembre 1995, un Boeing 747 (Cf. Figure 29) s'apprête à décoller de l'aéroport JFK à New York (*National Transportation Safety Board*, 1996).



Figure 29 : Un Boeing 747

Sur cet avion, le train avant est manoeuvré par un petit volant à portée de main du pilote. Ce volant doit être utilisé à basse vitesse lorsque l'avion ne peut être dirigé avec les gouvernes. Le jour de l'accident, la piste était enneigée et glissante. L'avion a commencé à dévier de l'axe de la piste. Le pilote aux commandes a augmenté le braquage du train avant sans pour autant parvenir à récupérer la trajectoire de l'avion. Le pilote n'a pas tenu compte de l'absence d'effet du braquage du train sur la trajectoire de l'avion du fait de la neige présente sur la piste. Le décollage a été abandonné trop tard et l'avion est sorti de la piste causant 24 blessés légers.

Les trois occurrences d'accident qu'on vient d'aborder sont des exemples de représentations erronées. Dans le cas du Swearingen SA226, l'équipage ne connaissait pas la position exacte de l'avion dans le plan vertical. Dans le cas du Metro III, le pilote instructeur n'a pas eu conscience de la perte d'altitude et de l'imminence du crash. Dans le cas du Boeing 747, le pilote aux commandes a abandonné trop tard la procédure de décollage. Dans les trois cas, l'avion était manoeuvré dans des conditions particulières et des erreurs ont été commises. La conjugaison de ces deux facteurs a généré une configuration de vol non maîtrisée. Les mêmes actions dans des conditions stabilisées ou dans des conditions météorologiques favorables n'auraient pas produit les mêmes conséquences. On peut tenter de conclure à la non prise en compte de la part des équipages de ces avions d'un paramètre exceptionnel de la situation. C'est ce que la littérature anglo-saxonne désigne par le concept de *situational awareness* : "*Les sujets ont une connaissance ou une expérience dans leur base de connaissances qui, à un moment donné, ne fait pas partie de ce à quoi ils pensent*" (Laughery & Wogalter, 1997, p. 1176).

Les accidents qui sont exposés ensuite sont plus directement rattachés à notre problématique. On verra que le traitement des symptômes joue un rôle majeur dans l'occurrence

de l'accident. L'éventuelle impression de simplicité des événements ne doit pas occulter l'extrême complexité de l'activité de pilotage et les contraintes de temps auxquelles les pilotes sont soumis. Sur le plan causal, l'analyse qui sera donnée ici sera largement réductrice. Il faudra donc garder à l'esprit que les accidents sont le résultat de beaucoup de facteurs déclencheurs ordonnés en chaînes d'événements (Kruysse, 1992 ; De la Garza, 1999). Cette chaîne s'étend depuis la construction de l'avion jusqu'aux facteurs organisationnels intervenant dans l'élaboration des consignes de pilotage. Seuls quelques maillons d'ordre ergonomique de cette chaîne seront discutés ici pour les besoins de notre problématique.

3.1.2.2 Crash d'un A320 au Mont Sainte Odile, Bas-Rhin

Le 20 Janvier 1992, à 18 heures 20, un Airbus A320 (Cf. Figure 30) s'écrase non loin du Mont Sainte Odile (Bas Rhin), causant la mort de 87 personnes. La commission d'enquête qui a tenté de déterminer les causes de l'accident a retenu comme probable le scénario suivant²⁴. En approche de l'aéroport de Strasbourg, le commandant de l'A.320 s'apprête à effectuer une approche dite ILS 23. L'ILS (*Instruments Landing System*) est une approche guidée par un faisceau d'ondes radioélectriques émises dans l'axe de la piste et qui permet à l'avion une approche très précise. Une ILS 23 signifie que cette approche se fait sur une piste orientée à 230° (sud-ouest). La piste en service ce jour-là était la 05, orientée à 50° (nord-est). Les conversations enregistrées dans les boîtes noires montrent que l'intention du commandant était de procéder à une ILS 23, puis de contourner l'aéroport à vue et de se poser sur la piste 05. Au lieu de cela, le contrôleur propose une approche dite VOR 05. L'approche VOR (*VHF Omnidirectional Range*) est également guidée par ondes radio électriques mais de précision moindre que celles de l'ILS et surtout, elle remet en cause le plan déjà élaboré. En aviation, le commandant est responsable de sa décision. Cependant, le contrôleur est la personne la mieux placée pour conseiller une approche. Le commandant accepte la VOR 05.

²⁴ Le résumé du scénario de l'accident tel qu'il est présenté dans cette thèse a été établi avec le concours d'un pilote de l'aviation civile.



Figure 30 : Un Airbus A-320

La charge qui a résulté de ce changement d'approche est probablement à l'origine de l'erreur. Lors d'une approche, le pilote choisit parmi deux modes de descente. Le mode FPA (*Flt Path Angle*) programme une descente dont la valeur doit être entrée en degrés. Le mode VS (*Vertical Speed*) programme une descente dont la valeur doit être entrée en pieds par minute. Dans ces deux modes, la valeur est entrée à l'aide de deux chiffres. La commission considère probable l'erreur selon laquelle le pilote a entré 33 en mode VS, ce qui signifie une descente à 3300 pieds/minute au lieu de 3.3° de pente de descente en mode FPA. Les conséquences sont une descente trop rapide (3300 pieds/minute au lieu de 800 pieds/minute) et un crash à 350 km/h sur une trajectoire de descente inclinée à 11°.

A la lecture du rapport (*Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme*, 1993), on relève des anomalies d'organisation au sein de la compagnie et un manque de communication au sein de l'équipage. Dans un cockpit, l'équipage a des annonces obligatoires à effectuer lorsque des changements des paramètres de vol importants surviennent. Dans le cas de l'Airbus, le pilote a omis plusieurs annonces, empêchant le copilote d'avoir accès à des informations de vol importantes. En ce qui concerne la compagnie, le système de retour d'expérience fonctionne mal et les pilotes ont tendance à ne pas communiquer les erreurs qu'ils commettent, privant les autres pilotes d'un volume de connaissances important, notamment dans les situations de résolution d'incident. Pour Wanner (1998), le retour d'expérience permet de déceler toute une gamme de défauts (organisation, conception, formation, documentation) et de discuter certains événements critiques. En cela, le retour d'expérience est un outil de prévention. Dans le cas de l'accident de l'A320, le pilote a été privé de la connaissance des occurrences passées de cette erreur. Le rôle préventif du retour d'expérience n'a donc pas joué.

Pour certains, l'absence de détecteur de proximité de sol (GPWS pour *Ground Proximity Warning System*) a contribué à l'accident. Cependant, comme le fait remarquer Hoc (1996), le

GPWS aurait produit deux alarmes que l'équipage aurait mal interprétées du fait du délaissement de la navigation verticale. La dernière alarme (justifiée) n'aurait pas forcément été traitée de façon optimale à cause de l'adaptation des réponses des opérateurs à la fiabilité des alarmes (Bliss, 1995).

Sur le plan ergonomique, certains événements paraissent particulièrement pertinents quant à la compréhension de l'accident :

- . La même erreur de programmation a déjà été commise sur ce type d'avion.
- . L'équipage a délaissé la navigation verticale au profit de la seule navigation latérale.
- . L'erreur de position n'a pas été détectée.

Le fait que l'équipage ait délaissé la navigation verticale est probablement un effet de la charge. Le changement d'approche a obligé l'équipage à rechercher l'axe de la piste en sortie de virage et a focalisé l'attention de celui-ci sur le plan latéral. Le point le plus intéressant en ce qui nous concerne est la non détection de l'erreur. Cette non détection est présente à plusieurs moments du déroulement de l'accident. Elle est présente lors de l'entrée de la valeur de descente dans le pilote automatique et tout au long de la descente. Lors de la descente, 30 secondes avant l'accident, le pilote a commencé à sortir les aérofreins afin de ralentir l'appareil. Cette mesure démontre qu'une situation anormale a été perçue sans que sa cause puisse être identifiée. Ce type d'erreur est rapporté par O'Hare, Wiggins, Batt et Morrison (1994) qui, après le dépouillement de plus de 700 accidents de vol, constatent que les erreurs de diagnostic de l'état du système forment à elles seules 10% des erreurs commises par les pilotes. Dans 16% des cas, ces erreurs sont associées à un crash grave. Ces mêmes auteurs remarquent que les erreurs de procédure sont commises par des pilotes ayant moins de 100 heures de vol. Ce constat conforte les données rapportées par Cellier, Eyrolle et Bertrand (1995) selon lesquelles les travailleurs débutants montrent des fréquences d'accident élevées, accompagnées d'un taux de gravité élevé. L'accident de l'A320 rappelle tout de même que les opérateurs experts sont eux aussi soumis à des mécanismes d'erreur.

Le type d'accident tel que celui du Mont Sainte Odile est qualifié de "collision avec le relief en vol contrôlé". Il concerne les occurrences où un appareil en conditions de vol normales percute involontairement le sol. Ce type d'accident est à l'origine de plus de la moitié des morts survenues en avion de transport public. Pour la période 1988-1993, il a été la cause de 1883 décès (Air Inter, 1995a). Ces chiffres laissent penser que les spécialistes des facteurs humains ont un rôle à jouer dans la prévention des accidents. On peut aussi constater que des accidents surviennent en l'absence de tout incident. Souvent (on le verra dans l'exposé des autres accidents d'avion), un des pilotes (voire les deux) a une représentation erronée de la situation. L'avion est piloté hors des limites de vol normal sans que cela soit détecté par l'équipage. Dans le cas du

Mont Sainte Odile, l'excès de pente n'a pas été corrigé. A l'origine de cette erreur, on trouve une donnée valide (3.3). Selon la commission d'enquête, parmi toutes les erreurs qui peuvent être commises par un équipage, celles qui génèrent un comportement anormal suite à une donnée valide sont les plus difficiles à détecter. Pour que cette détection ait lieu, il est nécessaire que l'équipage perçoive le caractère anormal des paramètres du vol. Cela ne semble pas avoir été le cas.

3.1.2.3 Atterrissage train rentré d'un DC9 à Houston, Texas

Le rapport d'accident est issu du *National Transportation Safety Board* (1997). Le 19 Février 1996, un DC-9 (Cf. Figure 31) est en approche de l'aéroport de Houston, Texas, vers 08:40. Le commandant de bord (CdB) et le copilote sont des opérateurs expérimentés.



Figure 31 : Un DC-9

A 09:02, l'avion se pose sur la piste 27 sans avoir sorti ni le train d'atterrissage, ni les volets²⁵. Il glisse sur plus de 2000 m et s'immobilise dans l'herbe, à 46m de l'axe de la piste. On recense 12 blessés légers. L'avion est irréparable.

Voici les retranscriptions de certaines données enregistrées dans le cockpit.

- 08:45:31 : Le copilote (aux commandes) demande la *in-range check-list*.
- 08:45:37 à 08:46:10 : Le commandant de bord (CdB), qui lit la check-list, oublie l'item *hydraulics*.

Accidents des transports et catastrophes industrielles

- 08:54:49 : Le copilote demande la check-list d'approche (CLap).
- 08:55:27 : Interruption de la CLap par le copilote qui demande 40° de volets pour l'atterrissage
- 08:55:56 à 08:58:08 : Suite et fin de la CLap. Le vol est autorisé à atterrir.
- 08:59:00 : Copilote : *go slats²⁶ and five.*
- 08:59:03 : CdB : *slats are going to five.* Le CdB affirme avoir senti les becs.
- 08:59:14 à 08:59:37 : Le CdB engage une conversation sur la météo.
- 09:00:00 : Le copilote remarque l'indicateur des volets à 0°.
- 09:00:11 : Le CdB annonce l'aéroport en vue.
- 09:00:13 : Le copilote demande 15° de volets. A ce moment, le copilote montre au CdB que l'indicateur de volets est à zéro.
- 09:00:33 : Le CdB dit *I think the flaps ...²⁷*
- 09:00:35 : trois alarmes successives du système de train d'atterrissage causées par le CdB manoeuvrant les leviers de puissance
- 09:00:37 : CdB : *Well, we know that you want the gear.*
- 09:00:38 : Copilote : *gear down.*
- 09:00:40 : Le CVR²⁸ enregistre un bruit sourd similaire à celui de la sortie du train.
- 09:00:41 : Le copilote demande 25° de volets.
- 09:00:46 : Alarme du train d'atterrissage. Le copilote demande 40 puis 50° de volets. Le CdB pense que cette alarme est due aux 25° de volets avant que le train soit verrouillé.
- 09:01:00 : Copilote : *I don't have any flaps.*
- 09:00:58 : L'avion vole à 216 noeuds à 34 secs de se poser.
- 09:01:02 : Le copilote demande au CdB s'il faut abandonner cet atterrissage et reprendre de l'altitude. Réponse : *No, that's alright.* Le CdB sait disposer d'une piste de 3500m et pense avoir le train et les volets.
- 09:01:07 : Fin d'alarme du train
- 09:01:13 : Alarme du GPWS²⁹ : *whoop whoop pull up* (3 fois).
- 09:01:15 : Reprise de l'alarme du train d'atterrissage qui continue après l'atterrissage.
- 09:01:18 : L'avion vole à 204 noeuds, à 12 secs de se poser³⁰.
- 09:01:32 : L'avion se pose sur le ventre.

²⁵ Les volets sont situés sur le bord de fuite de l'aile et servent à augmenter sa portance.

²⁶ Les slats sont les becs de bord d'attaque de l'aile. Ils servent à augmenter la portance de l'aile.

²⁷ La suite de l'enregistrement est inintelligible.

²⁸ *Cockpit Voice Recorder.*

²⁹ *Ground Proximity Warning System.*

³⁰ D'après un pilote contacté pour l'éclaircissement de certains points de ce rapport, cette vitesse est excessive d'au moins 40 noeuds (74km/h).

Les opérations au sol, de décollage et d'atterrissage se font avec les contacteurs des pompes hydrauliques en position HI et les contacteurs AUX et ALT en position ON. Les pompes sont remises sur LOW après le décollage et doivent être remises sur HI à l'atterrissage lors de la check-list. L'examen de l'avion a révélé que le levier de train était en position train sorti et les volets réglés à 50°. Les pompes hydrauliques droite et gauche étaient réglées sur la position LOW et les contacteurs ALT et AUX sur OFF. Avec ces réglages, ni le train ni les volets ne peuvent sortir. Parce qu'il était en basse pression, le circuit n'a pas permis de descendre le train et de déployer les volets. L'équipage n'a pas détecté cette erreur de configuration et a continué vers Houston. Cependant, l'équipage a constaté l'absence de volets sans pouvoir en déterminer la cause et sans exécuter de go-around³¹. Lorsque l'avion est passé à 500 pieds d'altitude (166m), sa vitesse était supérieure de 84 noeuds (155km/h d'excès) à la vitesse cible. A cette vitesse, il faut faire un go-around. Le GPWS a sonné pendant 19 secs avant l'impact mais a été ignoré.

Plusieurs erreurs de la part de l'équipage ont été notées par la commission d'enquête :

1. *Echec de configuration du système hydraulique.* Le contrôle de la configuration du système hydraulique aurait permis d'avoir les volets et le train sortis. Le copilote n'a pas détecté l'oubli du CdB. Si le système hydraulique n'est pas configuré lors de la CLap, l'absence de train et de volets devra être diagnostiquée à un moment du vol (juste avant l'atterrissage) où la charge de travail est forte³². Une recherche supportée par la NASA à propos de la conception des CL suggère que les items critiques devraient être placés en premier.

2. *Echec à déterminer d'où vient l'impossibilité de déployer les volets.* Puisque le système hydraulique était mal configuré et que l'équipage ne l'a pas détecté à partir des jauges, le moment propice à la détection était l'extension des volets à 5° à 08:59:00. L'équipage a dit avoir senti l'extension des volets mais celle-ci n'était pas de 5°. L'équipage ne s'en est pas rendu compte alors que :

- . des témoins se sont allumés indiquant "MASTER CAUTION" et "HYD PRESS LOW" ;
- . l'avion n'a pas roulé lors de l'extension des volets ;
- . les jauges indiquaient 0° de volets au lieu de 5°.

3. *Pas de CL d'atterrissage (CLat) et pas de confirmation de la position du train.* Le CdB aurait dû démarrer la check-list d'atterrissage lors de la commande de descente du train. Le copilote était probablement absorbé par l'approche rapide de l'avion sur Houston et le CdB avait peu de temps pour répondre aux requêtes du copilote (40° puis 50° de volets). En conséquence, aucun des

³¹ Un go-around est un abandon d'atterrissage et une remise de gaz.

³² De plus, l'absence de volets empêche la réduction de vitesse car l'aile ne porterait pas suffisamment.

deux pilotes n'a pu confirmer l'état du train. Pourtant des indices attestant que le train n'était pas sorti existaient :

- . pas d'augmentation du bruit ;
- . témoin d'ouverture des portes du train éteint ;
- . témoins de verrouillage du train éteints ;
- . alarme de train presque continue.

Les pilotes n'ont pas pu effectuer la CLat et détecter le problème de train à cause de la charge de travail résultant de la rapidité de l'approche et de l'enchaînement des événements dans la dernière minute. Si cette CL avait été effectuée, l'équipage aurait détecté le problème de train.

4. *Pas de go-around.* L'approche de l'avion, sa vitesse, sa configuration et les alarmes nécessitaient un abandon de l'atterrissage et une remise de gaz.

Un même problème de pompes hydrauliques a déjà été rapporté sur un autre DC-9 en 1995 et avait fait l'objet d'un go-around. Des pilotes ont également rencontré ce problème rapportent que les manuels n'expliquent pas clairement que si les pompes sont oubliées dans la check-list, il n'y aura ni volets ni train. Des pilotes interrogés par la commission d'enquête ont affirmé qu'il est possible d'oublier la configuration des pompes si l'approche est interrompue ou faite rapidement. Certains pilotes attendent un roulis lors du déploiement des volets car ceux-ci ne se déploient pas exactement en même temps. Un pilote a indiqué qu'il a un jour détecté l'absence de volets par l'absence de roulis. Un autre pilote interrogé durant l'enquête affirme que lors d'un vol, il a été alerté de l'absence de train lorsqu'il n'a pas entendu les bruits caractéristiques de la sortie du train.

Cet accident peut être discuté en termes d'échec dans la détection d'indices. La charge joue le rôle de déclencheur. Les raisons pour lesquelles l'item *hydraulics* a été oublié par le CdB ne sont pas clairement détaillées dans le rapport d'enquête. Compte tenu du nombre d'opérations à effectuer pour préparer un avion de ligne à l'atterrissage (navigation, programmation du pilote automatique, configuration de l'avion, dialogues radio avec le sol, etc.) la charge est souvent élevée. Elle est un facteur de non-récupération de l'erreur (l'oubli de l'item dans la check-list). La dernière check-list, qui configure l'avion pour l'atterrissage, aurait permis de détecter la cause du comportement incontrôlable de l'avion. Cette check-list s'effectue dans les derniers moments du vol qui recouvrent une période particulièrement dense en échanges radio et manoeuvres. Dans la mesure où les deux pilotes avaient pris du retard dans la planification des différentes opérations d'approche, du fait du comportement de l'avion et des tentatives de remédiation, la check-list d'atterrissage a été oubliée. Paradoxalement, c'est au moment où la charge est forte et qu'une check-list supplémentaire doit être effectuée que se situe l'opportunité pour les pilotes de détecter

leur erreur. Cette dernière check-list ayant été négligée faute de temps, la mauvaise configuration de l'avion n'a pas pu être détectée. Cet accident révèle que la détection d'indices dépasse largement le cadre de la perception de témoins et autres messages d'alerte. Une fois l'item *hydraulics* oublié et la descente engagée, plusieurs témoins lumineux indiquaient plus ou moins directement un problème de train. A ces témoins se sont ajoutées des alarmes (de train et de proximité de sol). L'incapacité, pour l'équipage, de faire converger ces indices vers une cause est le facteur déclencheur central de l'accident. Le copilote, qui était aux commandes de l'avion jusqu'à l'arrivée au seuil de piste, a fait remarquer au CdB que les indicateurs de volets affichaient zéro. La perception de l'information, nécessaire mais insuffisante pour établir l'origine du problème de configuration, n'est qu'une étape du processus de diagnostic. De plus, comme le signale la commission d'enquête, la détection de l'absence d'indices normaux et parfois plus difficile que la détection de la présence d'indices anormaux.

En conclusion, on peut discuter l'utilité de certaines alarmes dans les cockpits. Comme le font remarquer Bliss et Gilson (1998), les opérateurs adaptent leur réponse à la pertinence des alarmes. L'alarme de train (qui a sonné pendant plus d'une minute) est souvent négligée par les pilotes qui voient en elle un distracteur plus qu'une source d'information. Cette alarme est conçue de telle manière qu'elle peut s'activer même dans des phases de vols non critiques et sans danger. Des messages sont alors traités comme fausses alarmes. Une étude de l'association américaine ALPA (*AirLine Pilot Association*) (citée dans Air Inter, 1995b) rapporte que seuls 46% des pilotes considèrent les alarmes comme valides. Le taux de pertinence d'une alarme diminue en même temps que la confiance de l'opérateur dans le pouvoir d'information de cette source. En conséquence, les fausses alarmes répétées peuvent potentiellement supprimer des indices utiles au traitement de la tâche en cours.

3.1.2.4 Crash d'un Boeing 737 à Kegworth, Royaume Uni

L'exposé de l'accident provient de Ladkin (1996). Un Boeing 737 (Cf. Figure 32) quitte l'aéroport de Heathrow pour Belfast le 8 Janvier 1989 à 19:52 avec 8 membres d'équipage et 118 passagers. Lors de la montée, une pale du réacteur n°1 s'est brisée, ce qui a donné une baisse de puissance dans ce moteur et des fluctuations de ses paramètres. A cause d'une erreur de lecture, l'équipage décide de couper le moteur n°2. Les vibrations du moteur n°1 ont cessé au même moment, ce qui a fait croire à l'équipage qu'il avait bien traité l'incident. L'avion se dérouta vers l'aéroport de East Midlands. L'approche se déroule presque normalement, avec quelques vibrations. A 2,4 nautiques de la piste, le moteur n°1 subit une baisse de puissance. Il n'est pas

possible de redémarrer le moteur n°2. L'avion se crashe sur un talus au pied d'une autoroute causant 47 morts et 74 blessés.



Figure 32 : Un Boeing 737

Suite au déclenchement d'une alarme, le premier officier alerte son commandant : *"It's a fire coming through"*. Le commandant de bord demande : *"Which one is it ?"*. L'officier répond : *"It's the le... it's the right one"*. Le commandant demande alors de réduire sa puissance.

- . 2 mn et 7 secondes après les premières vibrations, le moteur n°2 est coupé.
- . 36 secondes avant l'impact, alarme d'incendie sur le moteur 1 retentit.
- . 29 secondes avant impact, l'alarme du GPWS commence à sonner indiquant que l'avion perd de l'altitude.
- . par deux fois, l'équipage essaie en vain de redémarrer le moteur n°2.
- . 10 secondes avant l'impact, le commandant de bord annonce aux passagers de se préparer à un atterrissage forcé.

L'enquête a conclu que l'EIS (*Engine Information System*) fonctionnait lors de l'accident. L'EIS est composé de barres de LEDs (des cristaux liquides) qui indiquent les paramètres des moteurs (température, vibrations, pression, carburant) Après enquête auprès de 120 pilotes, il s'avère que l'EIS ne pose pas de problème particulier de lecture, même si 64% des pilotes préfèrent les pointeurs électromécaniques. Une majorité de pilotes pense que l'EIS à LEDs ne permet pas d'attirer l'attention sur des changements rapides des paramètres des moteurs. La lecture des paramètres de l'EIS est particulièrement difficile pour les vibrations de moteurs. Les pilotes n'ont pas vu l'indication de vibration dans le moteur n°1 et d'autres informations les ont

conduit à penser que c'était le moteur n°2 qui avait des problèmes. Si ce sont les instruments qui les ont conduits à cette conclusion, alors il se peut que la manière de présenter l'information dans l'EIS ait contribué à l'erreur. Pour Ladkin (1996), L'EIS est une avancée technologique en termes de fiabilité et de maintenance. Cependant, les paramètres des moteurs sont difficiles à distinguer et de ce point vue, c'est un pas en arrière en ce qui concerne la présentation de l'information. Sa mise en service a fait l'objet de l'approbation de la FAA (*Federal Aviation Administration*) et la CAA (*Canadian Aviation Administration*) en Octobre 1988 mais n'a pas fait l'objet d'évaluations en ce qui concerne la présentation de l'information aux pilotes.

A la lecture du rapport de Ladkin (1996), il apparaît que les causes de l'accident sont multiples et réparties entre le fabricant des pales, l'institut de certification et les pilotes. La casse de la pale est l'événement déclencheur des vibrations dans le moteur et le travail des pilotes devient une récupération d'incident. Le facteur qui a contribué à l'aggravation des conditions de vol est la confusion des deux moteurs et l'arrêt du moteur valide. Il semble que cette erreur soit liée à une difficulté de lecture de l'EIS. La détection des symptômes et l'extraction des informations situationnelles importantes revêt une importance particulière dans ce genre de situation dans la mesure où la décision de couper un moteur peut s'avérer irréversible pour des raisons techniques ou par manque de temps. Cette décision de couper le moteur valide a été facilitée par la non prise en compte de toutes les informations disponibles, peut-être dans le but de gagner du temps et pour protéger le moteur de détériorations trop graves. Les facteurs suivants ont contribué à la réponse incorrecte de l'équipage (Ladkin, 1996) :

- . des vibrations du moteur, du bruit, des tremblements et une odeur de feu jamais rencontrés simultanément et non couverts par les procédures standards ;
- . une réaction prématurée au problème du moteur et de façon contraire à l'entraînement ;
- . la non assimilation des indications des instruments avant de couper le moteur n°2 ;
- . les vibrations du moteur n°1 ont cessé avec l'arrêt du n°2 ;
- . l'équipage ne savait pas que des flammes s'échappaient du moteur du n°1.

Sur le plan de l'extraction des symptômes, on peut noter l'importance que revêt le feedback produit par le système en réponse aux actions de l'opérateur. La coupure du moteur n°2 a correspondu avec l'arrêt des vibrations du moteur n°1. Le diagnostic en situation dynamique semble dépendre fortement de la perception que l'opérateur a de l'efficacité de ses actions. Si une action modifie les symptômes présentés par le système, l'opérateur peut attribuer cette modification à son action plutôt qu'à une variation due à une autre cause.

3.1.3 Les accidents industriels

3.1.3.1 Explosion à la centrale nucléaire de Three Mile Island, Pennsylvanie

Les informations sur le déroulement de l'accident sont issues du rapport de la commission dirigée par Kemeny (1981). Le 28 Mars 1979, à la centrale nucléaire de Three Mile Island³³ (TMI), à 4:00 du matin, une série de pompes d'alimentation en eau des générateurs de vapeur s'arrête accidentellement. Cette baisse du flux d'eau de refroidissement dans le réacteur fait augmenter la pression dans un organe du circuit appelé pressuriseur (noté *pressurizer* sur la Figure 33).

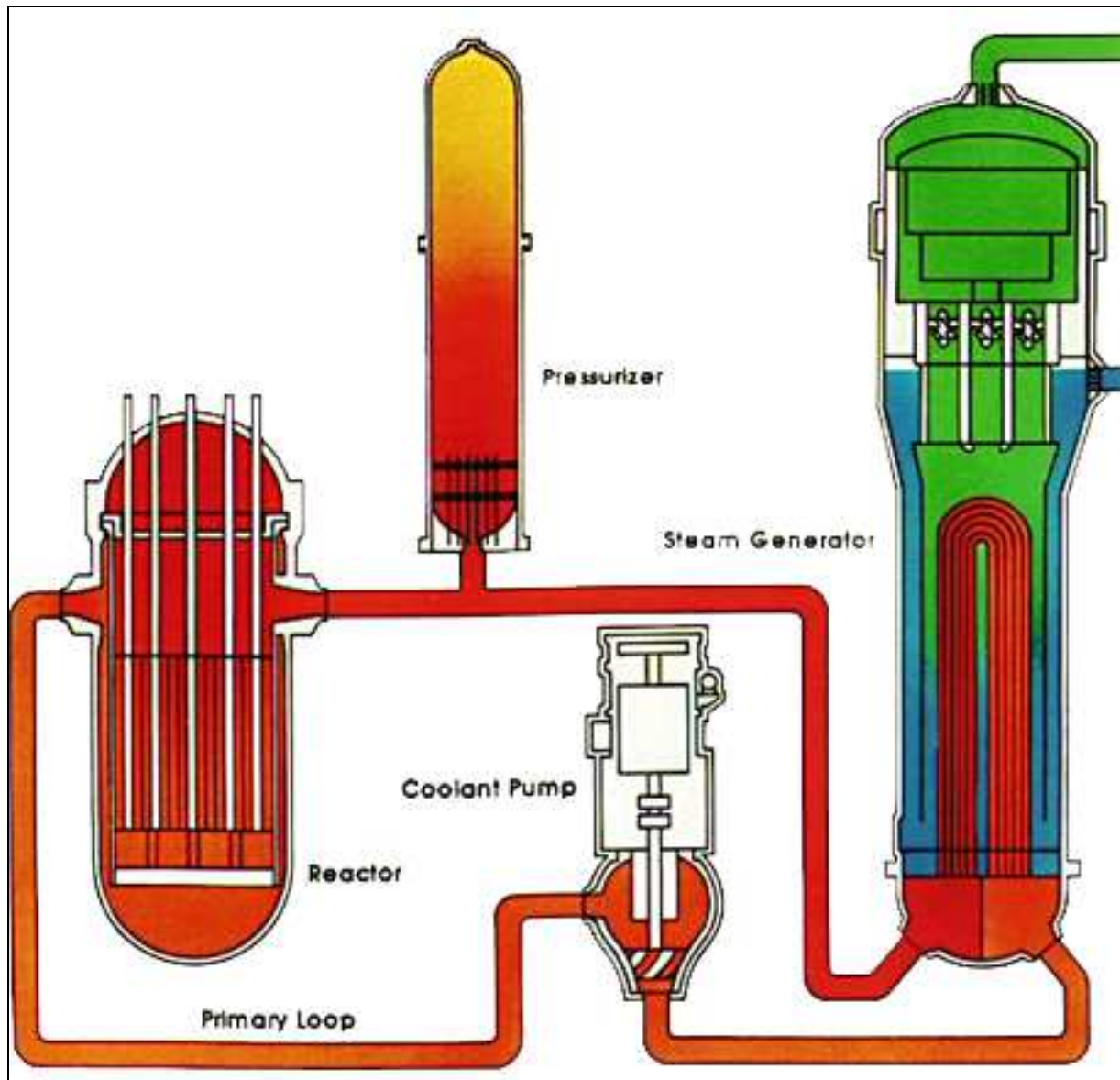


Figure 33 : Un réacteur nucléaire (circuit primaire).

Cette hausse de pression dans le pressuriseur provoque l'ouverture d'une soupape PORV (*Pilot Operated Relief Valve*) qui reste bloquée ouverte. Cette fuite d'eau de refroidissement provoque une augmentation de température qui déclenche le scrambling (arrêt de la fission par l'insertion de barres de contrôle en graphite dans le cœur du réacteur). Lorsqu'un réacteur fait un scrambling, la fission est arrêtée mais les produits de fission présents dans le réacteur continuent à chauffer l'eau. Cette chaleur doit être évacuée. Trois pompes de refroidissement HPI (*High Pressure Injection*) se mettent en route automatiquement mais deux des trois lignes d'évacuation sont fermées le jour de l'accident. En conséquence, la chaleur croissante du cœur n'est pas évacuée. La pression dans le pressuriseur monte encore et la pression du circuit de refroidissement chute. Les opérateurs commettent une erreur d'interprétation en considérant la pression à l'intérieur du pressuriseur comme représentative de la pression du circuit de refroidissement dans son ensemble. Deux pompes d'urgence se mettent en route pour rétablir le niveau d'eau dans le réacteur. Compte tenu du niveau de pression déjà élevé dans le pressuriseur, les opérateurs craignent un niveau d'eau trop élevé dans le circuit. Ils réduisent le flux d'eau de refroidissement d'urgence de 90%. La température continue à augmenter et des bulles de vapeur déplacent l'eau présente dans le cœur et contribuent à augmenter la pression dans le pressuriseur. A 5:00, 4 pompes de refroidissement vibrent sévèrement du fait du manque d'eau dans le circuit. A 6:54, un opérateur tente de remettre une pompe en route mais l'éteint 19 minutes plus tard du fait d'importantes vibrations. Peu avant 7:00, les opérateurs déclenchent une urgence de site pour risque de contamination de l'environnement immédiat.

Au moment critique de l'accident, seul un tiers du cœur du réacteur était recouvert d'eau. Ce manque d'eau a fait réagir le placage de zirconium des barres de combustible avec la vapeur présente dans le cœur. Cette réaction a formé une bulle d'hydrogène qui a explosé sans créer de dommages. C'est la conséquence de la fonte partielle du cœur, suite à une fuite d'eau de refroidissement et à un arrêt du système de refroidissement d'urgence du cœur (Lamarsh, 1981). Cet incident montre les effets que peut engendrer une erreur d'interprétation de symptômes dans un système dynamique dégradé. Les opérateurs ont craint un niveau d'eau trop élevé dans le circuit de refroidissement et l'ont régulé sur la base d'indices inadéquats (le niveau d'eau dans le pressuriseur).

Cette fixation sur le pressuriseur les a conduits à négliger de nombreux indices d'une fuite d'eau par la vanne PORV :

- . un niveau d'eau élevé dans le bassin de rétention ;
- . une température élevée de la conduite de vidange ;
- . les vibrations des pompes ;
- . les mesures de taux de neutrons anormaux dans le cœur.

L'aspect dynamique d'une centrale nucléaire et la complexité de son fonctionnement rendent potentiellement catastrophiques les erreurs non détectées. Un dysfonctionnement peut évoluer dans le temps de façon auto-entretenu grâce à la persistance d'une erreur de la part d'un opérateur qui joue alors un rôle actif dans l'aggravation de l'accident. Dans le cas de TMI, la fuite d'eau provoque une montée de température qui à son tour provoque une augmentation de pression. L'opérateur interprète cette pression comme un niveau trop élevé et vidange de l'eau. La pression monte encore et ainsi de suite. Lorsque les pompes HPI se mettent en route pour refroidir le cœur, l'opérateur les ralentit, afin de rester cohérent avec la procédure d'évitement d'un niveau d'eau trop élevé. Cette erreur de fixation a un effet suffisamment puissant pour conduire un opérateur à arrêter un système de refroidissement d'urgence (les pompes HPI), sans douter de la pertinence de ses actions. L'erreur de fixation dont est victime l'équipe de TMI trouve son origine dans une méconnaissance partielle de la centrale. La pression d'eau dans le pressuriseur ne reflète pas le niveau d'eau dans le circuit de refroidissement. Cette connaissance erronée amène l'opérateur à utiliser un indice de niveau d'eau non pertinent. La gravité de l'incident tient probablement à ce que l'erreur de fixation repose sur des données situationnelles indirectes et non valides.

Des erreurs de conception sont en partie à l'origine de la fuite d'eau. Dans les usines Babcock et Wilcox (le concepteur de TMI), on a recensé 9 pannes de vannes PORV sans que le constructeur en ait informé l'exploitant. De plus, le témoin de la vanne PORV, au tableau de commande, n'indique pas la position de la vanne mais seulement la commande de fermeture ou d'ouverture. Les opérateurs n'ont donc pas la possibilité de connaître sa position. Les vannes des lignes d'alimentation HPI étaient fermées suite à une erreur de maintenance. L'absence de contrôles de routine et la non vérification de l'alignement des vannes sont des facteurs aggravants de l'accident. De plus, au plus fort de l'alerte, plus d'une centaine d'alarmes étaient en marche dans la salle de contrôle.

Les erreurs de conception et de maintenance sont nombreuses et toutes ne sont pas citées ici. Ces erreurs participent à la genèse de l'accident et accentuent les effets des erreurs des opérateurs. Dans une étude de terrain comme celle qui a été menée à TMI, il faut étudier les erreurs des opérateurs en charge de la conduite de l'installation en gardant à l'esprit qu'ils sont

sensés travailler dans des conditions matérielles normales. L'apparition d'une panne fait partie des tâches qu'ils doivent résoudre mais la résolution d'un incident est d'autant plus difficile que les opérateurs ignorent l'état anormal du système (vannes HPI fermées, par exemple).

3.1.3.2 Explosion à la centrale nucléaire de Tchernobyl, Ukraine

Un accident nucléaire tel que celui de Tchernobyl provoque des désastres à l'échelle d'un continent. Ces conséquences imposent d'étudier cette source d'énergie sous l'angle de l'erreur à des fins de compréhension des événements passés et de prévention d'accidents potentiels. Cette étude est d'autant plus nécessaire que cette source d'énergie, paradoxalement pour des raisons écologiques, est devenue incontournable. C'est l'avis du *USSR State committee on the utilization of the atomic energy* (comité d'état sur l'utilisation de l'énergie atomique d'URSS) (1986), quelques mois seulement après l'accident de Tchernobyl.

Certaines données techniques vont être exposées afin de permettre une meilleure compréhension de l'accident. Ces données et le récit du déroulement de l'accident sont issus d'un rapport édité par le commissariat à l'énergie atomique du Royaume Uni (Gitus, 1988). Le réacteur de la centrale de Tchernobyl est du type RMBK. Ce type de réacteur est de conception instable. Il est caractérisé par :

- . un coefficient de vide positif (*positive void coefficient*). La réduction de la densité du réfrigérant dans le cœur fait augmenter la population de neutrons et donc la puissance du réacteur ;
- . un empoisonnement au Xénon 135 (Xe135). Le Xénon est appelé poison car il absorbe des neutrons et ralentit la fission. En conditions normales, la production et la destruction de Xe135 s'équilibrent. Lorsque la puissance baisse, le taux de Xe135 reste momentanément élevé et ralentit encore la fission. Cet effet doit être compensé en retirant des barres de contrôle du cœur afin de relancer la fission.

Le 25 Avril 1986, les opérateurs de la centrale lancent un plan de test de sécurité en cas de coupure d'électricité. Ce plan devait permettre de savoir si une génératrice, sur son inertie, peut continuer à alimenter les pompes de refroidissement du cœur en attendant la mise en route des groupes électrogènes. Jusqu'à 13:05, la puissance diminue, conformément au plan de test. A 23:10, la puissance chute à 30 mégawatts (MW) au lieu de 700MW du fait du retrait excessif de barres de contrôle. Le 26 Avril à 1:00, l'opérateur parvient à stabiliser la puissance à 200MW. La combinaison du vide positif et du xénon ont contraint les opérateurs à retirer encore des barres de contrôle pour relancer la fission et maintenir l'activité du cœur à un niveau de sécurité

acceptable³⁴. A 1:22, le réacteur est devenu instable. Les diminutions de puissance successives ont fait accélérer la circulation de l'eau dans le cœur, contribuant à un refroidissement accru et à une baisse de puissance du fait du coefficient de vide positif du réacteur. A 1:24, les conditions de l'accident sont réunies. Une explosion de vapeur fait exploser la cuve du réacteur. 3 à 4 secondes plus tard, une explosion d'hydrogène fait exploser le bâtiment de confinement. Le cœur est exposé à l'air libre et des fragments de graphite en feu sont projetés à l'extérieur du bâtiment.

Dans cet accident, les responsabilités sont littéralement éparpillées. Le constructeur, l'état, les dirigeants de la centrale, les ingénieurs en charge du plan de test et les opérateurs aux commandes de la centrale sont tous fortement impliqués³⁵. Parmi les types d'erreurs commises à Tchernobyl, on retrouve celles rencontrés dans les accidents exposés plus haut, notamment des erreurs de conception. Le réacteur était fondamentalement instable et les opérateurs avaient la possibilité de déconnecter manuellement des dispositifs de sécurité. La spécificité de l'accident de Tchernobyl est la combinaison de grandes lacunes de la part des équipes d'opérateurs, associées à la conduite d'un réacteur instable. Cet état de faits a conduit les opérateurs à générer des situations très risquées sans même en avoir conscience. Pour Rey et Bousquet (1995), les opérateurs adoptent un comportement prudent relativement à leur propre perception du risque. Il n'existe pas de relation simple entre le risque et les accidents. Il y a plutôt un réseau complexe de facteurs organisationnels et culturels qui déterminent le niveau de risque. Dans le cas de Tchernobyl, les facteurs organisationnels ont créé des erreurs latentes (Reason, 1995) et les opérateurs, faute de connaissances, ont pris des risques inconsidérés dans une situation où se sont combinés plusieurs événements improbables (*USSR State comitee on the utilization of atomic energy*, 1986). De l'avis même de l'auteur du rapport, les opérateurs ont enfreint tant de règles qu'on ne peut s'empêcher de penser que c'était une de leurs habitudes. Le récit de l'accident montre de multiples occurrences d'erreurs associées à des violations. Cette association génératrice d'accidents (Reason, 1995) est appelée *comportement aberrant* (Reason, 1987c). Commettre une violation est un facteur de risque. Cette prise de risque peut être évaluée par l'opérateur lorsque celui-ci a une bonne connaissance du système qui lui permet d'anticiper les conséquences de ses actes. Lorsque la connaissance du système est incomplète et que les conséquences des actes sont méconnues, des erreurs peuvent apparaître sans être détectées.

³⁴ Lorsque la puissance baisse, le taux de Xénon augmente et ralentit la fission. Une fission trop ralentie est dangereuse. Il faut donc la relancer en retirant des barres de contrôle du cœur. En d'autres termes, les opérateurs se trouvaient dans une situation dans laquelle ils devaient garder le contrôle d'un système en se privant des instruments de ce contrôle.

³⁵ Il serait trop long et hors de propos d'exposer la multitude de facteurs aggravants qui se sont enchaînés à Tchernobyl. Pour un exposé détaillé, se reporter au rapport de Gitus (1988).

3.1.4 La composante humaine dans les systèmes

En faisant allusion à la sécurité des installations nucléaires, Green (1981) affirme qu'aussi longtemps que les êtres humains resteront imparfaits, il y aura des accidents. Même s'il y a une part de réalisme dans cette affirmation, il reste que l'homme sait résoudre des situations non répertoriées. Le revers de cette qualité qui le rend irremplaçable est qu'il peut lui aussi être à l'origine de dysfonctionnements (Dupont, 1994). Dans un système, il représente le maillon le plus complexe, le plus vulnérable et le plus imprévisible de l'ensemble homme-machine (Villiers, 1994).

La connaissance des mécanismes cognitifs à l'œuvre dans une situation d'urgence, des phénomènes de charge mentale et de l'existence de différents modes opératoires a permis de cerner les conditions d'apparition de certains accidents. L'étude du crash de l'A320 au Mont Sainte-Odile a révélé qu'un changement d'approche finale vers l'aéroport de Strasbourg est probablement à l'origine d'un changement de mode opératoire. Les opérateurs ont dû employer une méthode d'approche peu utilisée et se sont trouvés dans une situation de charge telle que des valeurs incorrectes ont été introduites dans le système de pilotage automatique. Dans le cas des accidents industriels, la responsabilité des organisations qui dirigent les installations est souvent et fortement engagée. Les erreurs commises par les organisations sont difficiles à détecter car elles n'ont pas d'effet immédiat, ce qui rend leur détection et/ou leur prévention difficile. Les effets de telles erreurs se produisent lorsque des conditions d'apparition sont réunies, généralement à l'occasion d'un accident ou d'une situation d'urgence. Ces erreurs latentes (Reason, 1990) sont commises loin du lieu du travail par des décideurs et sont transmises jusqu'au lieu de travail où elles favorisent l'apparition d'erreurs et de violations (Reason, 1995 ; Air France, 1997). Même dans le cas de la défaillance d'un élément d'un dispositif technique, on s'aperçoit que la cause directe est rarement un défaut de fabrication non détecté mais plutôt un défaut d'entretien ou une utilisation hors normes. Un des exemples les plus significatifs est l'explosion de la navette Challenger. L'analyse (*Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident*, 1986) montre que la cause de l'accident (une fuite de carburant due à une défaillance d'un joint d'étanchéité) était connue des responsables. Les essais de sécurité de la pièce ont montré que celle-ci présentait des anomalies. Ce constat n'a pas été pris en compte et volontairement occulté. Un autre exemple d'erreur de conception concerne le naufrage du ferry Estonia en mer baltique (Meister & Laur, 1997). Sur ce type de bateau l'étrave se soulève pour embarquer les véhicules. Cette porte-étrave mobile été arrachée de ses gonds par les vagues dans des conditions météorologiques difficiles mais navigables. Les points de fixation de la porte-étrave étaient sous-

dimensionnés. Lors de la construction du bateau, certains organismes internationaux chargés de la sécurité des homologations n'avaient pas émis de directives techniques concernant la conception de ce type d'étrave. A travers ces quelques exemples, on constate que le ou les opérateurs impliqués dans une occurrence d'accident ne sont pas seulement ceux qui sont aux commandes du système au moment où l'événement se produit (Hoc, 1996). Un exemple de l'implication d'un facteur autre que celui de l'opérateur dans la genèse de l'accident est rapporté par Jaffe (1981) et concerne l'accident à TMI. Ses critiques, ainsi que celles de Marrett (1981), portent sur la conception même de la centrale et particulièrement la salle de contrôle. Selon cet auteur, une salle de contrôle devrait permettre de traiter les urgences et pas uniquement la norme. De plus, la vanne PORV qui a causé la fuite à TMI était connue pour ses défaillances. Ces faits incitent l'auteur à rappeler que la durée de construction d'une centrale nucléaire est d'environ 12 ans. Compte tenu de la rapidité avec laquelle se produisent les avancées technologiques³⁶, la conception d'un système aussi complexe qu'une centrale nucléaire doit profiter de techniques de pointe afin de ne pas être obsolète avant même sa mise en service (Jaffe, 1981).

Dans les accidents exposés dans ce travail et probablement dans la majorité des accidents des systèmes dynamiques, le diagnostic revêt une grande importance. Dans un environnement dynamique, la sécurité impose de connaître l'évolution possible des actions menées. C'est, selon Reason (1987c), un des aspects de l'accident de Tchernobyl. Les opérateurs, face à un système complexe, raisonnent de manière linéaire et sont plus sensibles aux effets immédiats de leurs actions qu'à leurs effets secondaires sur le reste du système. Le diagnostic est un outil de régulation. L'opérateur ajuste sa conduite de l'installation en fonction de la représentation qu'il construit de l'état futur du système. Si cette représentation est exacte, la conduite du système est une anticipation d'un état futur. Si la représentation est erronée, la conduite du système devient une suite d'actions de correction. La qualité de la représentation de l'état futur du système dépend des connaissances que l'opérateur a de ce système et de ses capacités à pronostiquer. Le pronostic vise à connaître les états futurs du système à l'aide des indices présents. C'est un diagnostic décalé dans le temps³⁷. La qualité du pronostic dépend de la pertinence des symptômes extraits. Si ces symptômes ne reflètent que partiellement la situation en cours, la représentation de l'état du système dans le futur peut être erronée et conduire à un accident.

³⁶ En 1981, Jaffe faisait allusion à la micro-électronique. Aujourd'hui, il pourrait s'agir de l'informatique.

³⁷ Pour un modèle de la gestion des incidents en situation dynamique, voir Amalberti (1996).

3.1.4.1 Ressources cognitives et complexité

Une des causes d'erreurs dans le raisonnement humain est l'activation d'heuristiques sur la base d'indices erronés. Mais l'homme emploie ces stratégies intuitives car il ne peut faire face à toute l'information disponible (Rouse, 1978). La complexité d'un problème, surtout s'il est nouveau, affecte les performances dans la résolution de problèmes. Pour Rouse et Rouse (1979a) et Léonard (1988) la complexité peut être considérée de deux points de vue. D'un point de vue objectif, elle est une propriété de la tâche à traiter, indépendamment de l'individu. Dans cette conception, elle peut être mesurée par le nombre de pas de raisonnement requis pour résoudre un problème (Richard, 1990). D'un point de vue subjectif, c'est une propriété de la tâche en tant que traitée par l'humain. Dans cette dernière approche, les modes opératoires et les capacités du sujet interviennent dans la définition de la complexité. Amalberti (1996) propose une approche similaire. Les facteurs de complexité correspondraient à tout trait de la situation qui empêche l'exécution de la tâche nominale (c'est à dire la tâche telle qu'elle a été prévue initialement). Les deux causes principales sont soit une modification de la tâche et de ses exigences (survenue d'une panne, par exemple), soit une compétence insuffisante de la part de l'opérateur. Sanderson (1990) évoque également la question de la complexité. La performance de diagnostic diminue quand le nombre de composants et de connections du réseau causal augmente. Mais le nombre de composants n'est pas seul responsable du taux d'erreur. Le type de connaissances que le sujet développe à propos du système est également en cause : les pannes qui invoquent des croyances exactes sont plus faciles à diagnostiquer que des pannes invoquant des croyances inexactes. Il existe enfin une dissociation entre la capacité à reconnaître une preuve que l'état du système est anormal et la capacité à faire un diagnostic sur la base de cette preuve (Sanderson & Murtagh, 1990).

Pour Amerge et Mariné (1992), un premier facteur de complexité concerne la diversité des situations traitées, confrontant l'opérateur à des situations nouvelles. Ceci nous renvoie à Lucas (1987), pour qui beaucoup d'erreurs dans le contexte industriel prennent la forme d'erreurs de diagnostic de dysfonctionnement du système. La panne est une situation anormale, parfois rare et qui implique la mise en oeuvre de connaissances différentes de celles impliquées dans la conduite du processus. Un second facteur de complexité concerne la multiplicité et la diversité des variables à prendre en compte. On peut ajouter un troisième facteur qui est le délai de réponse du système aux actions de l'opérateur. Celui-ci implique que la conduite du système doit se faire en anticipation (Hoc, 1991, 1996). Sur le plan de la complexité et de la maîtrise des erreurs, c'est une donnée très importante puisqu'il peut exister un délai entre un dysfonctionnement et l'apparition des premiers symptômes (Das, Jone & Wong, 1990).

L'analyse de l'erreur doit se faire sous l'angle de la limitation des capacités cognitives des opérateurs. La considération des aspects dynamiques de l'erreur humaine implique que l'apparition de fautes ou d'erreurs de la part d'un opérateur est due à l'état cognitif et au niveau de charge mentale (Cacciabue, 1991). Pour Far et Nakamichi (1993), la limitation des ressources dans le diagnostic a des effets sur la fiabilité humaine. Des ressources sont consommées lorsque les informations à traiter doivent être inférées et la décision, quand elle est basée sur un grand nombre de données, induit une charge importante. Pour Reed et Johnson (1993), un problème majeur en diagnostic est que les pannes ne sont détectables qu'au travers de symptômes observables. Quand le nombre de pannes possibles et d'observations devient important, beaucoup d'approches échouent dans la maîtrise de la complexité.

3.1.4.2 Les outils d'analyse d'événements

Dans le domaine de la sécurité, la fréquence et la gravité des occurrences d'accident dictent les mesures à prendre. Cette affirmation a probablement valeur d'axiome dans tous les secteurs industriels. Une faible fréquence d'occurrence ou une faible probabilité ne motivent pas toujours une mesure de protection mais des événements générateurs d'accidents se produisent parfois dans des conditions particulières et en même temps, rendant toute prévision extrêmement difficile (Wagenaar, 1990). C'est dans ce cas de figure que surviennent les catastrophes. La prévention des accidents peut s'opérationnaliser par des modèles et méthodes visant à comprendre l'enchaînement des événements accidentogènes. Ces outils permettent de prédire des faits ou de les expliquer a posteriori.

L'objet de cette thèse est l'étude de l'opérateur. On a tenté jusqu'ici de se concentrer sur les processus cognitifs qui supportent certaines de ses erreurs. Cependant, dans la démarche ergonomique qui est la notre, il peut être utile de survoler certains aspects de sécurité centrés sur les systèmes. Même si l'ergonomie cognitive fait de l'opérateur son objet d'étude, celui-ci est inséré dans un milieu pour lequel existent des outils formels dont l'objectif est la fiabilité.

3.1.4.2.1 L'arbre d'événement

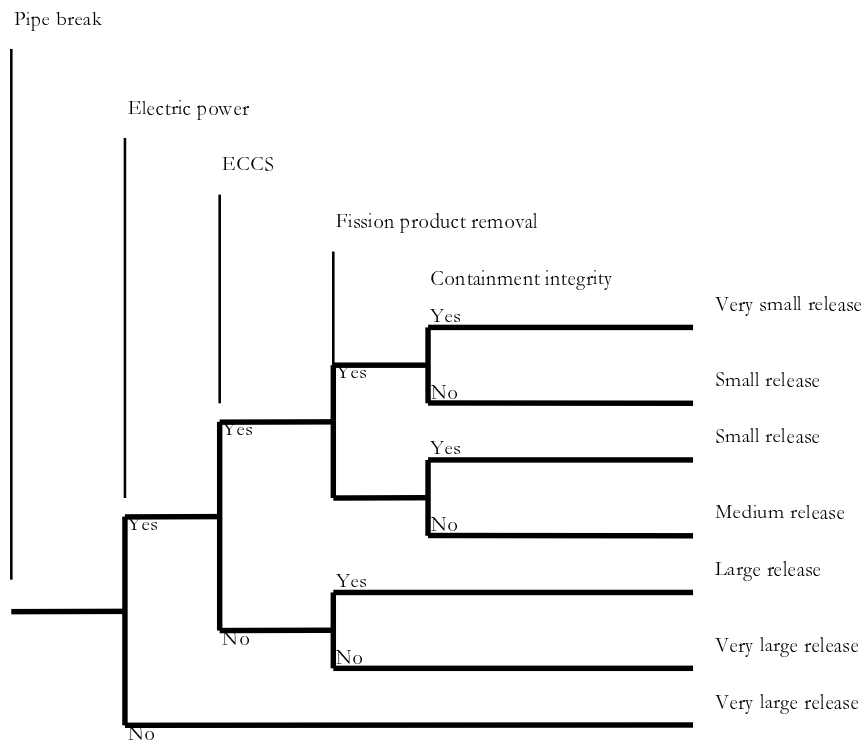


Figure 34 : Exemple d'arbre d'événement simplifié pour un accident de perte de réfrigérant dans une centrale nucléaire (Rasmussen, 1981)

La prise de mesures de sécurité lors de la conception d'un système est liée à la probabilité supposée d'un événement. Une des techniques de prédiction de la gravité des conséquences d'un incident est l'arbre d'événement. Cet arbre épuise toutes les possibilités de propagation d'un incident en fonction des états que peut prendre le système à chaque niveau de la chaîne causale. Depuis Tchernobyl, les progrès de l'informatique ont permis d'utiliser des codes de calculs probabilistes à partir desquels sont simulées des situations d'accident. Ces simulations sont utilisées à des fins de sécurité et de conception de système plus sûrs (Cf. Figure 34).

3.1.4.2.2 L'arbre d'erreur

L'arbre d'erreur sert à expliquer des faits et n'est pas probabiliste. Il permet de visualiser une chaîne causale représentée par des branches reliées entre elles par des fonctions logiques. Il détaille l'emboîtement des facteurs responsables d'un dysfonctionnement (Cf. Figure 35).

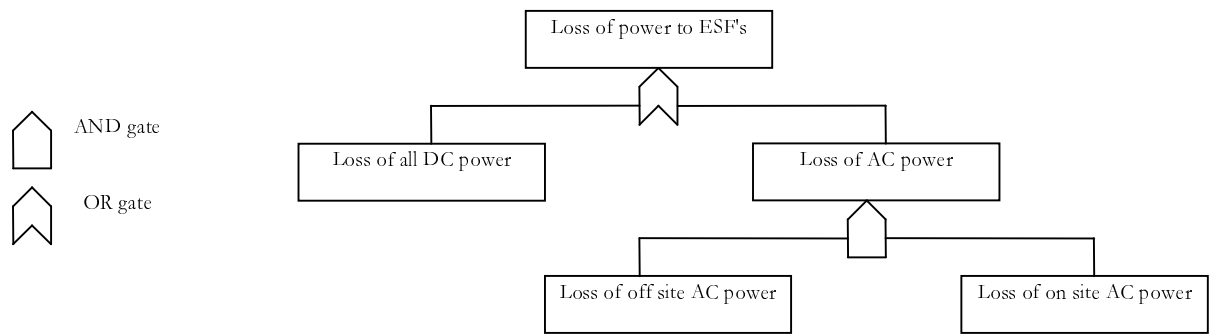


Figure 35 : Exemple d'arbre d'erreur simplifié pour une panne électrique (Rasmussen, 1981)

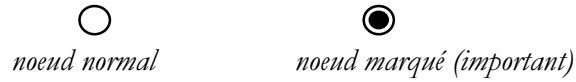
3.1.4.2.3 Les réseaux de Petri

Le langage naturel est accessible par une grande variété de lecteurs. Mais il y a de nombreuses limites. Johnson (1997) et Johnson, Mc Carthy et Wright (1995) s'appuient sur le rapport d'accident de Kegworth pour discuter ces limites :

- . *Incomplétude*. ex : de nombreux..., souvent... ;
- . *Références au temps inconsistantes*. Les informations de temps ne sont pas toujours données dans le même format ;
- . *Références aux objets inconsistantes*. Dans le rapport d'accident de Kegworth, les moteurs sont nommés 1 et 2 et parfois gauche et droit ;
- . *Manque de définitions précises*, sous-entendus ;
- . *Suppositions de relations de cause à effet*. Suite à une communication avec le contrôle aérien, le commandant décide de couper le moteur. Le rapport permet de supposer qu'il y a un lien de cause à effet qui n'existe probablement pas ;
- . *Suppositions à propos de connaissances du domaine*. Certains passages supposent que le lecteur connaît les procédures normales et d'urgence ;
- . *Représentation d'activités concurrentes*. Le langage naturel n'est pas adapté à la description d'événements simultanés (ex : pendant l'événement X, il se produit Y) ;
- . *Volume*. Un rapport en langage naturel est long et des détail importants peuvent être omis par le lecteur.

Les réseaux de Petri sont des graphes orientés. Ils ont été développés pour appréhender les propriétés temporelles des systèmes complexes. Le réseau est constitué de noeuds, de transitions et de flèches (Cf.

Figure 36). Les noeuds renvoient aux faits connus durant les diverses étapes d'un accident, désignent les opérateurs et le système :



Les transitions dénotent les événements qui génèrent ces faits. Une transition ne peut exister que si tous les noeuds qui mènent à elle sont vrais.



Les flèches relient les noeuds aux transitions. Elles sont soit activatrices, soit inhibitrices :

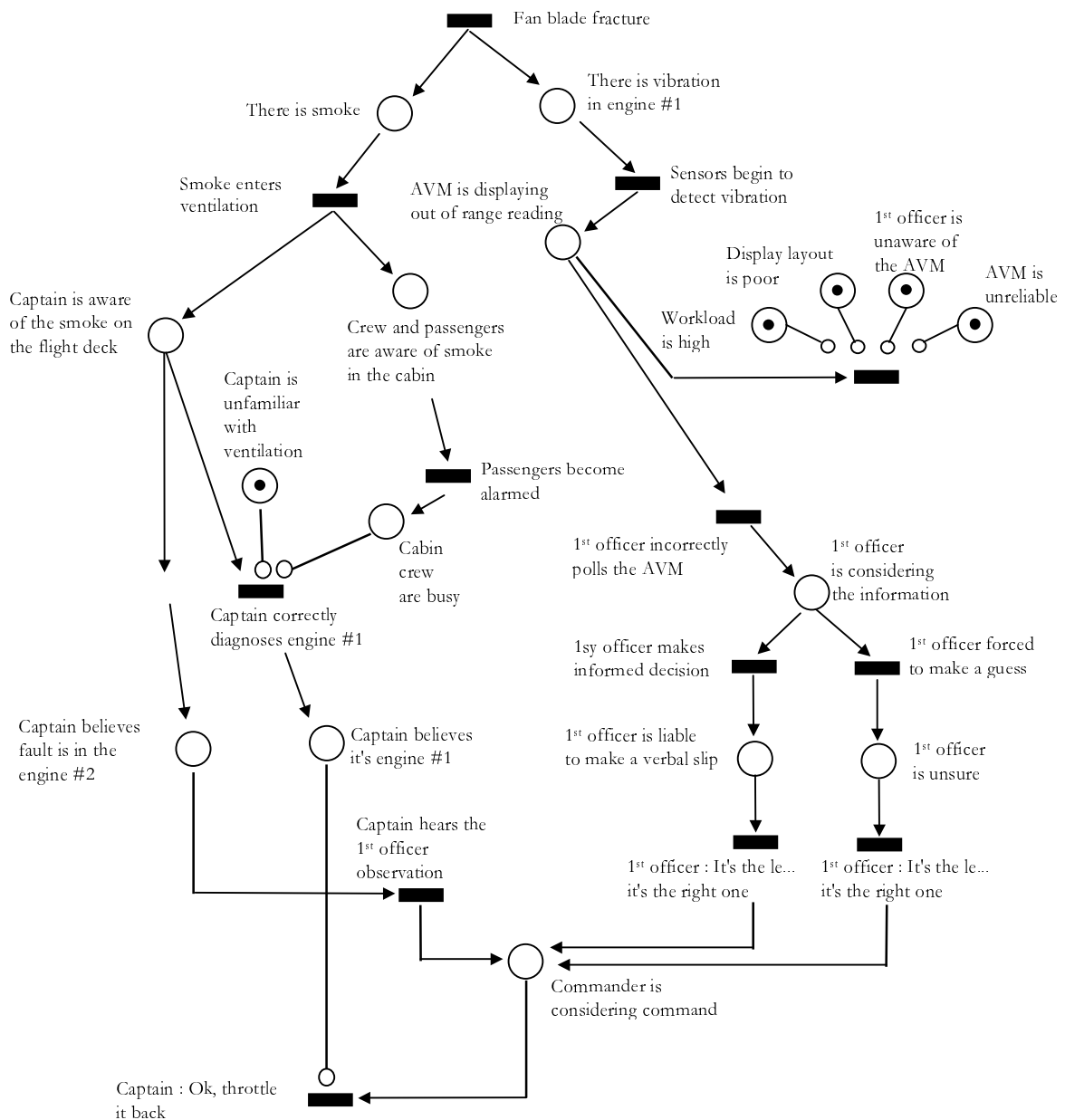


Figure 36 : Exemple de réseau de Petri appliqué à l'accident d'avion de Kegworth (Johnson, 1997).

Une des limites des réseaux de Petri est qu'il est difficile de nommer les noeuds et les transitions avec des étiquettes appropriées car d'une part les étiquettes doivent être concises et précises mais d'autre part elles doivent fournir l'information contextuelle nécessaire à propos des événements menant à l'accident (Botting & Johnson, 1998). Par exemple, l'étiquette "*1st officer is liable to make a verbal slip*" renseigne peu sur les justifications de cette analyse.

3.1.4.2.4 Les tableaux d'entités critiques

Il est important d'identifier les différents agents ou entités qui contribuent à la panne du système ou à l'erreur de l'opérateur. Ces entités sont : les opérateurs, les tâches, les composants (du système), les affichages (d'information), les commandes et les verbalisations. Chacun de ces éléments est analysé en tant que contribution causale à l'événement (Cf. Tableau 5).

Tableau 5 : Exemple de tableau d'entités critiques appliqué à l'accident de Kegworth (Johnson, 1997).

<i>Operators</i>	<i>Tasks</i>	<i>Components</i>
commander first_officer cabin_steward passengers	reprogram_fms radio_communication	n°_1_engine n°_2_engine blade_dampers fan_blade_17 shroud
<i>Displays</i>	<i>Commands</i>	<i>Utterances</i>
AVM FMS	shut_down throttle_back disengage	"It's a fire Kevin. It's a fire coming through". "Which one is it though ?" "It's the le..., it's the right one".

3.1.4.2.5 La FMECA

Tableau 6 : Exemple de FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) appliqué à l'accident d'avion de Kegworth (Johnson, 1997).

<i>Component</i>	<i>Failure mode</i>	<i>Failure cause</i>	<i>Criticality</i>	<i>Improvement</i>
Turbofan First Officer	Fracture Verbal slip	Fatigue High workload	High Medium	Maintenance Better training

Ce type d'analyse permet de représenter les causes d'un événement de façon synthétique. Sont présents dans cette analyse les acteurs de l'événement (l'opérateur, le système), les types d'erreurs produites par ces acteurs, la gravité de ces erreurs et les solutions possibles. Compte tenu du volume réduit d'informations présenté dans ce type d'analyse, le niveau de description de l'événement reste superficiel. Dans le cas présenté ici (Cf. Tableau 6), les informations présentées ne permettent pas de connaître les causes de fatigue de la pale du réacteur ou de la surcharge de travail de l'opérateur. Les causes premières (les causes de ces causes) ne sont pas présentes. Le caractère général de l'approche FMECA permet cependant d'établir un suivi actif d'une machine ou d'une installation. L'analyse ne concerne plus une situation passée mais un dispositif évolutif. Celui-ci est alors inscrit dans une continuité d'utilisation permettant de prévenir la survenue de certains accidents. C'est l'utilisation que Lecoufle et Riout (1997) font de cette méthode. C'est l'objet du paragraphe suivant.

3.1.4.2.6 Un exemple de méthode préventive : l'AMDEC machine

L'AMDEC machine (Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticalité ; Lecoufle & Riout, 1997) utilise des paramètres de contrôle de fonctionnement répartis depuis la conception jusqu'à l'utilisation et au dépannage. La machine est alors conçue comme un objet qui s'inscrit dans une continuité. Cette façon de considérer une machine permet d'éviter certaines cassures entre la conception et l'utilisation. L'objectif de rentabilité est atteint en partie en tenant compte de la criticalité des défaillances de la machine. La criticalité d'une défaillance se définit par sa fréquence, sa probabilité de non détection et la gravité de ses effets. Appliquée aux accidents cités plus haut, la criticalité permet de revoir la configuration des événements sous l'angle de la prévention. Lorsqu'un des trois paramètres de criticalité ne peut être défini pour une situation accidentogène donnée, les mesures de prévention sont incomplètes. Lorsque l'accident survient, la procédure de sécurité est forcément lacunaire elle transforme l'accident en catastrophe. Dans le cas du naufrage du Herald of Free Enterprise (Pour un exposé de l'accident, voir Reason, 1990), la configuration des événements a rendu les causes de l'accident non prévisibles et non détectées. Sur le plan de la criticalité, les causes du naufrage avaient une fréquence d'apparition très faible, une probabilité de non détection forte et des effets très graves. Cette configuration a généré un accident grave. A partir de la criticalité, les situations accidentogènes peuvent être catégorisées de sorte que des mesures de prévention ou de remédiation adaptées peuvent être mises en œuvre. Cette catégorisation implique que les valeurs des trois paramètres sont connues. La possibilité de calculer une probabilité de non détection

implique implicitement qu'elle a été envisagée par le concepteur ou rapportée par un utilisateur. Elle peut alors être intégrée à un modèle prédictif d'accident, par exemple. Si une configuration est non détectable, la criticalité ne peut être calculée et l'accident qui peut en résulter est non prévu.

3.1.4.3 Prévention, détection et récupération

Les outils d'analyse d'événements que nous venons d'aborder sont en grande partie centrés sur les systèmes et la composante humaine n'y est envisagée que comme un facteur parmi tant d'autres. Or l'homme a souvent un rôle déterminant dans la conduite d'une installation de par sa capacité d'adaptation à des configurations inconnues. La partie qui suit donne un aperçu de la nature de ses capacités de détection et de récupération.

La prévention est la première protection contre l'accident. Elle réunit des conditions de sécurité. En aviation, par exemple, la première protection est constituée par le suivi mécanique de l'avion. La seconde protection est constituée par l'exécution par le pilote des actions correspondantes à chaque phase de vol. La troisième et ultime barrière protectrice est la check-list (Buffet, 1997). Le non respect d'une de ces protections est une condition d'apparition d'accident mais les effets de la violation de procédure peuvent être compensés par le respect des autres mesures de sécurité. L'accident est extrêmement probable lorsqu'un incident survient alors qu'aucune des mesures de prévention n'a été respectée (Cf. Figure 37).

La détection de l'erreur se définit comme une prise de conscience de la part de l'opérateur qu'une erreur s'est produite indépendamment de la compréhension de son origine (Zapf, Maier, Rappensberger & Irmer, 1994). Les heuristiques de détection et de récupération des erreurs consistent en une série d'auto-contrôles basés sur la trace des activités intellectuelles et des résultats attendus. Ces contrôles au hasard, polymorphes mais quasi continus permettent de déceler les dissonances entre les résultats attendus et les résultats obtenus (Amalberti, 1996). C'est la vérification standard, dont le but de rechercher des informations afin de les comparer à un cadre de référence (Rizzo, Ferrante & Bagnara, 1995). Pour Doireau, Wioland et Amalberti (1997) les capacités de détection et de récupération ont été longtemps sous-estimées en tant que composantes actives dans les dispositifs de sécurité. Elles apparaissent aujourd'hui directement liées au niveau d'expertise des opérateurs.

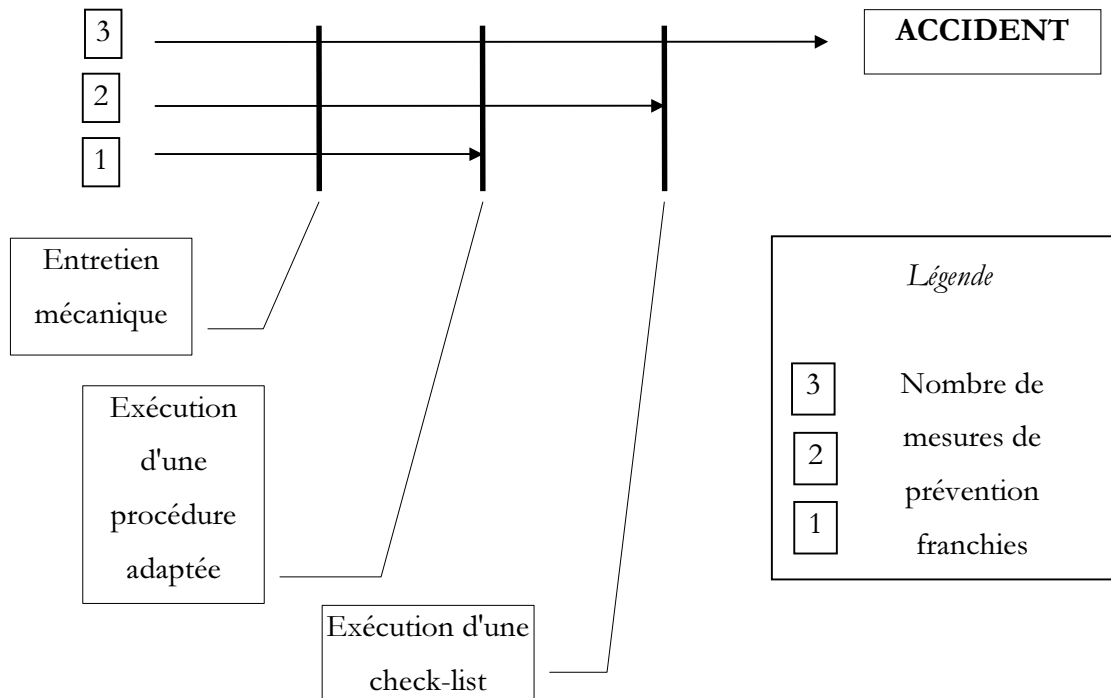


Figure 37 : Principe d'occurrence d'un accident en aviation (adapté de Buffet, 1997)

Ces auteurs isolent deux grandes stratégies de détection. La première renvoie à un système de référence normatif dans lequel l'opérateur conclut à une erreur en se basant sur le constat d'un écart à une procédure habituelle, un règlement, etc. La seconde stratégie renvoie à un système de référence historique où l'opérateur détecte une erreur en référence au contexte situationnel. L'erreur est alors comprise dans le cadre général de l'histoire de la situation.

La co-occurrence d'une erreur et de sa détection est caractéristique des situations définies (programmation, problème mathématique, etc.) La détection séparée temporellement de la survenue de l'erreur se rencontre dans les situations complexes comme certains dispositifs industriels (Rizzo, Ferrante & Bagnara, 1995) où existe un temps de rétroaction (Hoc, 1996). Les alarmes ne sont pas forcément l'outil adéquat pour détecter l'erreur quand elle est masquée par un temps de rétroaction, à moins que ces alarmes soient de nature anticipatrice. Dans ce cas, elles informent sur la possibilité d'occurrence d'une erreur en fonction des actions prises plutôt que sur les conséquences avérées de ces actions. Selon Amalberti (1996, 1997), ce n'est pas le nombre d'erreurs commises mais l'incapacité à les détecter ou les récupérer qui altère la performance d'un sujet. L'humain préfère commettre des erreurs en se laissant une possibilité de les récupérer tout en agissant sur un mode basé sur les habiletés plutôt que de tenter de ne commettre aucune erreur et devoir recourir à un mode de traitement contrôlé lent et coûteux. Dans le pilotage d'avion de combat, cet auteur (Amalberti, 1996) a souligné, l'importance de la planification dans l'évitement des erreurs. La planification permet de créer un scénario auquel le pilote peut se

conformer afin de limiter les zones d'incertitude lors de sa mission. En cela, la planification sert d'outil de prédiction. Pour Holyoak (1990), l'avantage de planifier est d'éviter de faire des erreurs et on peut penser que plus l'erreur est difficile à récupérer (ce peut être le cas du pilote de combat), plus la planification aura d'importance et devra être effectuée à un niveau de description fin.

Selon Wanner (1998), qui traite également du pilotage d'avions, on peut représenter l'état de fonctionnement d'une machine par un point d'état situé dans un espace à n dimensions, chaque dimension étant attribuée à un des paramètres de la machine. A chaque position du point d'état, on peut calculer une probabilité de catastrophe. Les règles d'emploi du système imposent à l'opérateur de maintenir le point d'état à une valeur nominale ou dans un domaine suffisamment éloigné des limites. Dans le même ordre d'idées, Amalberti (1992) pose que les humains établissent des marges de sécurité afin de minimiser les risques. Certains facteurs peuvent affecter ces marges de sécurité et devenir des sources d'accidents. Le niveau de risque d'une situation peut être décrit objectivement par les caractéristiques matérielles de la situation et par le niveau de compétence de ses acteurs. Mais le niveau de risque le plus pertinent dans une situation naturelle est celui qui est perçu par l'opérateur. Si cet opérateur est expérimenté, il dispose d'une certaine connaissance des risques (Cellier, Eyrolle & Bertrand, 1995). Dans le cas d'un opérateur inexpérimenté ou sous-qualifié, l'analyse des données environnementales ne permet pas l'anticipation d'une dégradation ou d'un accident (voir le récit de l'accident à Tchernobyl). Pour Amalberti (1992), les opérateurs tentent de maintenir un niveau de risque acceptable. Si le niveau de risque perçu diminue, les opérateurs suppriment progressivement des mesures de sécurité.

La détection et la récupération des erreurs ou des pannes dans le domaine industriel passent en partie par les alarmes. Elles doivent informer l'opérateur de la présence d'un risque et permettre de l'éviter (Wogalter & Laughery, 1996). Elles doivent être conçues de manière non invasive et doivent intégrer une fonction d'information (désignation explicite d'un élément du système) en plus de leur fonction naturelle d'alerte. Elles jouent le rôle de signal d'interruption dont le but est de déplacer le focus d'attention de l'opérateur. Elles sont utiles dans la détection d'un dysfonctionnement en tant que symptôme. Cependant, en situation dynamique, comme c'est le cas dans de nombreux processus industriels, un dysfonctionnement risque d'en entraîner beaucoup d'autres et des alarmes préventives peuvent se déclencher à un moment où la charge est importante. A la centrale de Three Mile Island, le nombre d'alarmes en marche lors d'un fonctionnement normal était d'environ 50. Lors de l'accident, ce chiffre a été multiplié par au moins 2. Outre la nuisance sonore ou visuelle, ces alarmes sont autant de messages à traiter qui peuvent ne concerner que des anomalies potentielles. Ces messages d'erreur impliquent des traitements qui sont autant de détournements de l'opérateur des buts prioritaires. C'est ce que

Woods (1995) nomme le *problème d'alarme*. La valeur d'aide d'une alarme en situation de diagnostic est fortement diminuée si elle représente un facteur de charge plus qu'un élément d'information sur le système. C'est le cas des alarmes qui indiquent un dysfonctionnement dans un sous-système sans en préciser la nature. Dans ce cas, l'opérateur doit rechercher la nature du dysfonctionnement en perdant momentanément le contrôle du processus. Une autre catégorie de problèmes causés par les alarmes concerne la nature de ces signaux et leur consistance avec l'environnement (Bliss & Gilson, 1998). Des faux signaux peuvent se produire. C'est le cas d'une alarme qui se déclenche lors d'un dépassement de seuil alors que ce dépassement est maîtrisé. Des signaux manquants peuvent perturber l'activité. Ils peuvent être le fait d'une définition trop stricte du seuil de déclenchement ou d'une désactivation volontaire suite à une perte de confiance dans une alarme (comme le remarque Bliss, 1995). Enfin, les alarmes peuvent être trop nombreuses et générer de la charge plus que de l'information.

Pour Zapf, Maier, Rappensberger & Irmer (1994), il faut faciliter la détection par l'utilisateur lui-même en augmentant le nombre d'informations disponibles et modifiant leur format. La détection des erreurs dans un système peut passer par une meilleure organisation spatiale des informations utiles à la conduite. Une option intéressante du point de vue de la synthèse des informations est la présentation en polygones (Greaney & McRae, 1996, Cf. Figure 38).

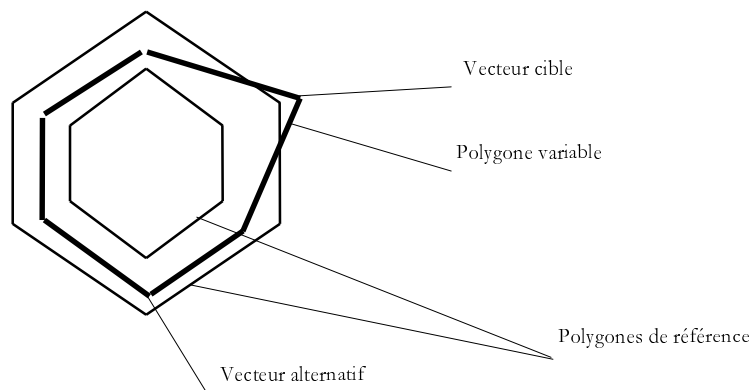


Figure 38 : Présentation en polygones. Adapté de Greaney & McRae, 1996

Ce mode de présentation permet de représenter un grand nombre de paramètres de conduite d'un système et de fournir une vue d'ensemble de l'état de ces paramètres. Le caractère spatial de cet affichage permet également de repérer des patterns graphiques, des configurations-type qui peuvent être associées à la connaissance d'un état précis du système. Ce type de présentation comporte autant d'angles que de facteurs (vecteurs) à représenter. Les angles du polygone variable représentent l'état des vecteurs en temps réel. Les marges de fonctionnement normal

sont matérialisées par les polygones de référence. Un angle du polygone variable qui sort des polygones de référence signale un paramètre hors normes. La présentation en polygones est plus un indicateur global qu'un moyen de présentation de paramètres individuels. Cependant les polygones peuvent fournir plus d'indications instantanées qu'un ensemble de témoins lumineux. Ici, le caractère graphique du système d'information rejoint la démarche de conception des pictogrammes utilisés dans la prévention des accidents (Wogalter & Laughery, 1996). Il faut informer sans surcharger (Wagemann, 1998).

3.1.4.4 Les systèmes d'aide et l'opérateur

A la fin des années 70, la technologie des ordinateurs a commencé à être appliquée et des systèmes de diagnostic automatisés sont apparus. Bien que cet accroissement de l'utilisation des ordinateurs ait permis l'apparition d'une dimension psychologique en ergonomie (Lévi-Leboyer & Spérando, 1987), ces systèmes n'ont pas toujours fonctionné aussi bien qu'il avait été espéré. Une meilleure compréhension des capacités de diagnostic de l'opérateur humain est importante dans la mesure où le rôle des hommes dans des systèmes automatisés est celui de dépanneur quand les ordinateurs rencontrent des problèmes qu'ils ne peuvent traiter (Rouse, 1979b). Aujourd'hui, les ordinateurs ont changé de statut. Ils ne sont plus les opérateurs de premier rang dans les tâches de diagnostic. La tendance est plutôt à la relégation des machines vers des tâches d'information et de soutien dans le dépannage. La priorité est donnée à l'homme tant pour des raisons de souplesse de traitement dans des situations inconnues que dans la diversité des champs d'application de ses compétences. L'optimalité ne peut être définie indépendamment des capacités de l'opérateur. L'homme reste le meilleur opérateur dans les situations mal spécifiées aux événements parasites fréquents. Il en résulte une orientation différente des recherches sur l'amélioration de la fiabilité de ses raisonnements dans les situations à risques. Plutôt que de remplacer l'opérateur, on souhaite maintenant assister et potentialiser ses capacités naturelles (Amalberti, 1991b).

3.1.4.4.1 *L'optimisation des systèmes d'aide*

L'architecture cognitive de la compétence peut prendre des formes diverses. Ceci entraîne que les modes de formation à une classe de tâches pourront différer et que les systèmes d'aide efficaces seront variables selon le type et/ou le niveau de compétence des opérateurs (Leplat, 1991). Par exemple, une présentation hiérarchique de l'information dans un système d'aide suppose que l'utilisateur connaît la catégorie générale qui contient les sous-catégories recherchées.

On sait que cette hiérarchie de l'information présentée au sujet peut influencer sur ses jugements (Van Schie & Van Der Pligt, 1990). Beaucoup de menus d'aide d'ordinateurs, prenant en compte la question de l'utilisateur, utilisent un mélange de présentations hiérarchiques (augmentation progressive du niveau de détail) et séquentielles (succession de niveaux de détail identiques) permettant à l'utilisateur de choisir un point de départ dans la base de données et ensuite de la parcourir à partir de ce point. Il y a quelques années, on pensait que seul l'entraînement pouvait augmenter la précision de la résolution de problème (Duncan, 1985). La réalité des faits remet aujourd'hui en question cette assertion. Un exemple est le système d'aide à la décision du pilote d'avion de combat Rafale. Face à une situation d'urgence, 80% des pilotes experts et 60% des pilotes novices répondent immédiatement pour échapper et stabiliser la situation. Puis une réponse optimisée est recherchée. Les décisions élaborées lors de la préparation de la mission sont essentiellement les décisions réflexes de la première partie de la réponse. La décision d'optimisation secondaire de la réponse est élaborée en vol en fonction du contexte et le système d'aide à la décision proposé au pilote du Rafale tient compte de cette prise de décision en deux phases (Amalberti, 1991b).

L'optimisation des systèmes d'aide implique la prise en compte de certaines caractéristiques cognitives de l'individu, que ce soit (a) sur le plan du format de ses connaissances ou (b) sur le plan du mode d'extraction de l'information. (a) Les opérateurs experts de formation classique (peu d'instruction mais beaucoup d'expérience) préfèrent les images mimétiques qui leur permettent des reconnaissances de situation, basées sur la saillance et la pertinence de certains détails vis-à-vis du diagnostic. Les ingénieurs ont un autre point de vue. La question posée est de savoir si la conception de l'expertise doit reposer sur une flexibilité du concret à l'abstrait ou s'il existe plusieurs types d'expertise. Dans le premier cas, il faut donner aux opérateurs l'accès au raisonnement abstrait et aux ingénieurs une vision du monde plus concrète. Dans le deuxième cas, il faut prêter attention aux processus naturels de structuration et d'acquisition de la connaissance dans différents types d'expertise en concevant des outils cognitifs qui supportent cette dynamique (De Keyser, 1991). L'adaptation du mode de présentation des informations sur le système à l'opérateur est également la préoccupation de Bisson, Soulard, Raimondo et Aknin (1992). L'optimisation de l'interaction homme-machine ne doit pas se contenter d'une interface graphique mais doit tenir compte des connaissances et des compétences de l'opérateur. A propos du mode d'extraction de l'information (b), Venda et *al.* (1994) isolent trois types de stratégies d'encodage : une perception par petits groupes d'éléments (2 à 4 éléments), une perception par chunks de taille moyenne (5 à 7 éléments connectés fonctionnellement) et une perception par chunks de grande taille (8 éléments et plus, connectés fonctionnellement). L'efficacité optimale de

l'opérateur serait atteinte si la stratégie utilisée et les écrans d'information (configuration graphique, nombre de signaux simultanés, intensité du signal) étaient adaptés l'un à l'autre.

3.1.4.4.2 Modèle du prescripteur et modèle de l'utilisateur

La consigne d'aide idéale est celle qui présente des informations à la fois pertinentes, utilisables et compréhensibles. Le respect de ces critères permet de faire converger le modèle de la tâche du prescripteur (qui écrit la consigne) et celui de l'utilisateur (qui utilise la consigne). Si ces deux modèles comportent des divergences, l'opérateur omet des conditions d'application de la consigne ou oublie des actions de cette consigne. C'est ce qu'on remarqué Veyrac, Cellier et Bertrand (1997) dans le traitement de situations incidentelles par les conducteurs de trains. Pour ces auteurs, le modèle de résolution d'un incident ne se limite pas au modèle prescrit. Ce modèle, véhiculé par la consigne, peut être éloigné de celui de l'opérateur ce qui implique soit une correction de la consigne, soit une formation de l'opérateur. Dans les situations d'urgence, le fait que l'utilisateur ne soit pas le concepteur peut avoir des conséquences graves. Les décalages possibles entre la représentation que l'utilisateur a d'un système et la logique de conception de ce système peuvent être à l'origine d'accidents ou empêcher la récupération d'erreurs (Tijus, Richard & Leproux, 1996). Grant (1997) note que les accidents d'avion sont souvent discutés en termes d'erreur d'opérateur mais il se peut que les interfaces de vol soient moins qu'idéales en ne délivrant pas toutes les informations nécessaires à une séquence d'actions correcte ou en mobilisant trop de ressources attentionnelles.

L'avenir des systèmes d'aide réside peut-être dans l'analyse de l'activité de l'opérateur par la machine. Dans des systèmes intelligents d'aide à la décision, il devrait être possible de laisser un ordinateur analyser les demandes de l'utilisateur afin d'identifier la stratégie qu'il essaie d'utiliser et ensuite de fournir un support par l'affichage de messages adéquats (Rasmussen, 1991). On serait alors en présence d'un système souple qui s'adapterait aux modes opératoires humains. Ce type d'aide commence à apparaître dans certains système d'exploitation d'ordinateurs sous l'appellation d'aide contextuelle. Selon l'endroit où l'opérateur se trouve dans le système, une aide spécifique lui est proposée. Certes, ce type d'aide est tout de même rigide puisque l'aide contextuelle ne varie pas d'un opérateur à l'autre. On s'oriente tout de même vers une conception moins universelle de l'aide, plus active et organisée autour du déroulement de l'activité. Les aides à l'écran permettent d'utiliser des fonctions informatiques de stockage et de récupération. A ce titre, la machine permet de retracer un historique. Elle permet aussi d'utiliser des fonctions d'animation. Kieras (1992) a étudié l'intérêt des diagrammes dynamiques à l'écran en tant qu'aides au contrôle d'une

machine fictive. Les résultats montrent que ce contrôle est facilité par l'utilisation de couleurs. Ces couleurs animées en temps réel diminuent la durée du diagnostic des incidents. Les résultats de Kieras peuvent avoir un caractère trivial. Cependant, ils renforcent l'idée que les machines informatiques ont des capacités intrinsèques d'aide au pilotage et au contrôle qui devraient orienter une part importante des travaux ergonomiques portant sur les activités de contrôle vers les interfaces et les problèmes de présentation de l'information à l'écran.

3.1.5 Vers une ergonomie cognitive industrielle?

Dans ce chapitre, on a mis l'accent sur deux points. Le premier concerne l'éclairage qu'apporte l'ergonomie cognitive sur les accidents. La fiabilité humaine demeure une préoccupation majeure dans le transport et dans les grands sites industriels. La connaissance des capacités cognitives des opérateurs permet d'orienter les démarches de conception et, le cas échéant, de comprendre le rôle de la composante humaine dans les accidents. Le deuxième point concerne les implications de la composante humaine dans les systèmes. On a tenté de mettre en évidence le fait que l'opérateur est un acteur essentiel des processus complexes. La prise en compte de ses capacités de traitement, des possibilités d'erreur et des différences de niveau de compétence constitue un pas vers l'intégration de l'homme dans les systèmes. Cependant, certaines approches, à visée essentiellement matérielle il est vrai, tendent à exclure l'opérateur des modélisations du système. On fait allusion principalement à l'arbre d'événement et à l'arbre d'erreur. Sur ce point, notre position prétend que l'homme ne peut être écarté des modélisations des systèmes puisqu'il est présent, à travers son rôle de concepteur jusqu'à celui de contrôleur, à tous les niveaux de fonctionnement d'un système. A l'instar de la fusion de données provenant de plusieurs sources comme outil global de détection d'accidents de la route (Cohen & Bettiol, 1997), la solution quant à la pertinence d'un système de surveillance et de prévention se trouve peut-être dans la mixité. Elle pourrait reposer par exemple sur l'intégration du facteur humain dans les outils formels d'analyse d'événement.

L'ergonomie vise à intégrer l'opérateur dans le fonctionnement du système, voire à concevoir le système en fonction de ses spécificités. La sécurité des grands systèmes à risques a longtemps favorisé l'idée du zéro erreur. Aujourd'hui, une solution réaliste semble être l'intégration dans le système de possibilités d'erreurs de la part des opérateurs (Doireau, Wioland & Amalberti, 1997 ; Starr, 1981) et la poursuite de l'étude de l'erreur afin de développer une classification permettant d'orienter les modifications à apporter sur les systèmes (*Evaluative*

Classification of Mismatch de Booth, 1991, par exemple). Au niveau de la conception, la solution est peut-être la mise en place de marges de tolérances, de possibilités d'annulation d'actions longtemps après qu'elles ont été effectuées et de systèmes au moins partiellement réversibles. Par exemple, la détection différée de l'erreur ne doit pas condamner l'opérateur à tenter de conserver l'équilibre du système mais doit lui permettre de le restaurer (Rizzo, Ferrante & Bagnara, 1995). A ce titre et même s'il existe des limites quant à son application, la fonction d'annulation *undo* semble être le dispositif idéal (Zapf & Reason, 1994).

4. CONCLUSION GENERALE

La pré-expérience en électronique a montré que des opérateurs novices peuvent mettre en œuvre de meilleurs tests que les experts. Cela concerne en particulier le nombre d'opérations sur les CI et les répétitions. Les CI ont une grande importance dans le diagnostic expert et ces sujets les testent plus tôt que les novices. L'expérience finale a conforté l'importance des CI pour les experts. Afin de tester l'hypothèse d'indépendance du domaine d'activité, des expériences en mécanique ont été conduites. La pré-expérience a montré que les experts font moins d'opérations avant de tirer un fil et travaillent plus sur le 4^{ème} cylindre que les novices. Dans l'expérience finale, on a vu que les experts testent peu d'éléments du moteur. L'importance du 4^{ème} cylindre est confortée pour ces sujets et ils utilisent plus le carton du compressiomètre que les novices. En résumé, les experts accordent beaucoup d'importance aux composants qui expliquent les symptômes dans la plupart des cas (CI et 4^{ème} cylindre). Ce raisonnement probabiliste est soutenu par un appariement entre un pattern de symptômes et un ensemble de causes à tester. De ce constat, il ressort que le traitement des symptômes revêt une place centrale dans le diagnostic. Puisque celui-ci ne sert pas uniquement à dépanner des systèmes mais également à réguler leur fonctionnement, la question de savoir si les résultats expérimentaux peuvent expliquer certaines occurrences d'accidents a été posée. On s'est intéressé principalement aux accidents dans deux centrales nucléaires et à trois crashes d'avion de ligne. Dans tous les cas, le traitement des symptômes explique une grande partie de la gravité de l'événement. Dans le cas des accidents dans les centrales nucléaires, et particulièrement celui de Three Mile Island, l'impossibilité de faire converger des indices situationnels vers une cause de dysfonctionnement est à l'origine de l'accident. En ce qui concerne les accidents d'avion, la récupération d'incident joue un rôle important. La sélection des informations pertinentes pour traiter l'urgence est l'outil de base des pilotes en situation dégradée. Dans les trois occurrences, cette sélection n'a pas été optimale du fait du caractère atypique de la situation associée à la ressemblance à une configuration connue.

On conclut à une communauté de conduites chez les opérateurs de systèmes statiques (électroniciens et mécaniciens) et chez les opérateurs aux commandes de systèmes dynamiques. Il s'ensuit que la conception de l'expertise selon laquelle les opérateurs experts montrent des comportements rapides et fiables doit être modulée par l'existence d'un biais de fréquence qui

agit sur la sélection de l'information dans le milieu. Ce biais est supporté par une stratégie générale de résolution de problème basée sur l'activation d'une solution mémorisée. Les processus d'élaboration de solution se résument à l'adaptation d'une procédure connue et les erreurs relèvent d'une association erronée entre les données extraites et les procédures mises en œuvre. Pour autant, les très nombreuses recherches qui ont mis en évidence les qualités du raisonnement expert (rapidité, fiabilité, économie de ressources) ne peuvent être remises en cause. Tout au plus peut-on supposer que les résultats principaux de cette thèse ont leur place dans la théorie de l'expertise. La présentation de l'erreur d'expert qui a été faite vise à mettre en lumière un des aspects du raisonnement qui reste assez peu documenté. Peut-être est-ce un signe de la robustesse du raisonnement expert que de manquer de situations expérimentales permettant l'étude de ses dysfonctionnements. Du fait du rôle central qu'ils occupent dans les systèmes, les opérateurs experts peuvent générer des catastrophes lorsqu'ils commettent des erreurs. Mais l'expertise demeure tout de même un synonyme de compétence. Même s'il semble indépendant du domaine d'activité, le type d'erreur que nous avons mis à jour ne doit pas faire oublier la performance de l'expert, sa capacité à mettre en place des routines et à automatiser des chaînes d'actions. C'est parce que les sujets étudiés dans cette thèse sont experts que nous avons relevé certaines erreurs. Les comportements observés sont à considérer comme le reflet de l'expertise et non comme un de ses déchets. Ils reflètent l'adaptation de l'opérateur à son environnement de travail. Le raisonnement qui a conduit à l'erreur est celui qui, dans la majorité des cas, conduit à l'exactitude.

La communauté de conduites qui a été extraite des expériences de cette thèse peut être soumise à caution. On pourrait prétendre qu'elle n'est qu'un artefact. Même si la démarche de réplication permet de s'affranchir de certaines réserves, il reste possible que les résultats présentés ici soient très dépendants des dispositifs expérimentaux. On pourrait imaginer un prolongement de ce travail vers un élargissement transversal des domaines d'activité étudiés. L'étude d'autres situations de diagnostic permettrait d'investiguer la question de l'indépendance éventuelle des résultats de notre travail vis-à-vis du domaine d'activité. Le diagnostic médical est probablement un candidat prioritaire. On peut également imaginer une exploration plus poussée de l'expertise dans le diagnostic dans le but de mettre à jour une éventuelle linéarité de la compétence. On a vu dans l'exposé théorique sur l'expertise que plusieurs conceptions sont possibles. La conception en termes de suite d'états discrets ne rend probablement pas compte de l'acquisition et de la mise en œuvre des compétences humaines. Même si des pré-requis de haut niveau étaient requis pour franchir des étapes dans la construction de l'expertise, il reste que celle-ci s'élabore sur une période de temps si longue que l'on voit mal comment deux ou trois niveaux pourraient rendre compte d'une vie entière consacrée à apprendre et à affiner des connaissances. L'immense variété

de compétences qui existe dans un groupe d'opérateurs exerçant le même métier permet de se faire une idée de la polymorphie de l'expertise. De ce point de vue, il reste un travail considérable à accomplir si on poursuit l'objectif d'adapter le milieu à l'opérateur. Cela implique probablement de continuer à conceptualiser nos connaissances. Comme le font remarquer Life, Barber et Edworthy (1996), des disciplines comme la mécanique ou l'électricité sont formalisées en termes de lois. En revanche, la connaissance que nous avons des phénomènes cognitifs ne peut pas être formalisée dans les mêmes termes. En conséquence, la précision de nos modèles déterminera l'utilisation que l'on pourra faire d'eux.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDI, H. (1994). *Les réseaux de neurones*. Grenoble : PUG.
- ABERG, L. & RIMMÖ P-A (1998). Dimensions of aberrant driver behaviour. *Ergonomics*, 41, 39-56.
- Air France (1997). Anatomie d'un accident. F28-Dryden, Canada, Mars 1989. *Bulletin d'information sur la Sécurité des Vols*, 36, 2-7.
- Air Inter (1995a). Les collisions avec le relief : la dure réalité. *Bulletin de la Sécurité des Vols d'Air Inter*, 46, 3-5.
- Air Inter (1995b). Détecter les situations dangereuses. *Bulletin de la Sécurité des Vols d'Air Inter*, 46, 8-13.
- ALLWOOD, C. M. & BJÖRHAG, C.-G. (1990). Novices' debugging when programming in Pascal. *International Journal of Man-Machine Studies*, 33, 707-724.
- ALLWOOD, C. M. & BJÖRHAG, C.-G. (1991). Training of Pascal novices' error handling ability. *Acta Psychologica*, 78, 137-150.
- AMALBERTI, R. & HOC, J.-M. (1993). Un modèle heuristique des liens entre planification, diagnostic et action : Point de départ pour les recherches sur la résolution de problème en contrôle de processus. Actes du colloque de prospective *Recherches pour l'ergonomie*. Université de Toulouse-Le-Mirail (pp. 45-62).
- AMALBERTI, R. (1991a). Savoir-faire de l'opérateur : aspects théoriques et pratiques en ergonomie. in R. AMALBERTI, M. DE MONTMOLLIN & J. THEUREAU *Modèles en analyse du travail*. Liège : Mardaga (pp. 279-294).
- AMALBERTI, R. (1991b). Modèles de raisonnement en ergonomie cognitive. in *Science et Défense 91. Sécurité des systèmes. Neurosciences et ergonomie cognitive*.
- AMALBERTI, R. (1992). Safety and process control : An operator centered point of view. *Reliability Engineering and System Safety*, 38, 99-108.
- AMALBERTI, R., De COURVILLE, B., DENTAN, M.-C., GERVAIS, T., LABRUCHERIE, M. & PARIES, J. (1996). *Facteurs Humains*. Rungis : Institut Aéronautique Jean Mermoz.
- AMALBERTI, R. (1996). *La conduite de systèmes à risques*. Paris : P.U.F.
- AMALBERTI, R. (1997). L'homme facteur de fiabilité. *Pilote de ligne*, 15, 24-25.
- AMALBERTI, R. *Diagnostic et résolution d'incidents critiques par le pilote d'avion*. Manuscrit.

- AMALBERTI, R., BASTIEN, C. & RICHARD, J. F. (1995). Les raisonnements orientés vers l'action. in *Cours de Psychologie. Processus et Applications*. Paris : Dunod (pp. 379-413).
- AMERGE, C. & MARINE, C. (1992). Etude comparative expert-débutant lors de l'élaboration d'un pré-diagnostic ergonomique. *Le Travail Humain*, 55, 97-117.
- AMIGUES, R. (1985). Représentation graphique et représentation des connaissances. *Technologies Idéologies Pratiques*, vol 5 n°3, 59-75.
- ANDERSON, J. R. (1993). Problem solving and learning. *American Psychologist*, 48, 35-44.
- AROCHA, J. F. & PATEL, V. (1995). Novice diagnostic in medicine : accounting for evidence. *The Journal of the Learning Sciences*, 4, 355-384.
- ARSLANIAN, P.-L. (1995). L'enquête-accident : un outil de sécurité pour l'aviation. *Pilote de ligne*, 5, 14-15.
- BADDELEY, A. (1992). Is working memory working? The fifteenth Bartlett lecture. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 44, 1-31
- BADDELEY, A. (1996). La mémoire de travail : interface entre mémoire et cognition. In *Systèmes de mémoire chez l'animal et chez l'homme*. Marseille : Solal. (pp. 343-358). (Trad. de *Memory System.*, MA : M.I.T.).
- BADDELEY, A., PAPAGNO, C. & VALLAR, G. (1988). When long-term memory depends on short term storage. *Journal of Memory and Language*, 27, 586-595.
- BAINBRIDGE, L. (1993). Planning the training of a complex skill. . *Le Travail Humain*, 56, 211-232.
- BARFIELD, W. (1986). Expert-novice differences for software : Implications for problem-solving and knowledge acquisition. *Behaviour and Information Technology*, 5, 15-29.
- BASTIEN, C. (1992). Les représentations formelles de la cognition et de la représentation. in J. GERVET, P. LIVET & A. TETE (Eds) *La représentation animale*. Nancy : Presses Universitaires de Nancy.
- BASTIEN, C. (1997). *Les connaissances de l'enfant à l'adulte. Organisation et mise en œuvre*. Paris : Armand Colin.
- BAWDEN, H. H. (1900). A study of lapses. *Psychological Review*. Monograph Supplement, 3, 1-122.
- BELIERE, T. & PARISE, R. (1993). Différenciation de l'expertise. Exemple de mise en œuvre dans un contexte industriel. Actes du colloque de prospective *Recherches pour l'ergonomie*. Toulouse : Université de Toulouse-Le-Mirail.
- BENJAMINS, V. R. & ABEN, M. (1997). Structure preserving knowledge-based system development through reusable libraries : a case study in diagnosis. *International Journal of Human-Computer Studies*, 47, 259-288.

- BENOIST, Y. (1995). Le constructeur face à l'accident. *Pilote de ligne*, 5, 18-19.
- BEN-SHAKHAR, G., BAR-HILLEL, M., BILU, Y. & SHEFLER, G. (1998). Seek and ye shall find : Tests results are what you hypothesize they are. *Journal of Behavioral Decision Making*, 11, 235-249.
- BEREITER, S. R. & MILLER, S. M. (1989). A field-based study of troubleshooting in computer-controlled manufacturing system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 19, 205-219.
- BERRY, D. C. & BROADBENT, D. E. (1988). Interactive tasks and the implicit-explicit distinction. *British Journal of Psychology*, 79, 251-272.
- BESNARD, D & CHANNOUF, A. (1994). Perception infraliminaire de stimulus familiers et résolution de problèmes simples. *Annuario de Psicologia*, 62, 41-53.
- BESNARD, D. & BASTIEN-TONIAZZO, M. (1999). Expert error in trouble-shooting. An exploratory study in electronics. *International Journal of Human-Computer Studies*, 50, 391-405.
- BESNARD, D. & CACITTI, L. From trouble-shooting errors in mechanics to commercial air crashes. Soumis dans *International Journal of Human-Computer Studies*.
- BESNARD, D. (1994). L'expertise source de difficultés dans le diagnostic. Mémoire de DEA. Aix en Provence : Université de Provence.
- BISSERET A. (1970). *Analyse de la mémoire opérationnelle du contrôleur de la navigation aérienne*. Etude de l'Institut de Recherche d'Informatique et d'Automatique. Rocquencourt.
- BISSERET, A., FIGEAC-LETANG, C. & FALZON, P. (1988). Modélisation de raisonnements opportunistes : L'activité des spécialistes de régulation des carrefours à feux. *Psychologie Française*, 33, 161-169.
- BISSON, P., SOULARD, P., RAIMONDO, A. & AKNIN, P. (1992). Interfaces homme-machine multimodales et adaptatives pour systèmes opérationnels. <http://web.fdn.fr/~hfanchini/pub/92mon/mon.html>
- BLESSING, S. B. & ANDERSON, J. R. (1996). How people learn to skip steps. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 22, 576-598.
- BLESSING, S. B. & ROSS, B. H. (1996). Content effects in categorization and problem solving. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 22, 792-810.
- BLISS, J. P. (1995). Human probability matching behaviour in response to alarms of varying reliability. *Ergonomics*, 38, 2300-2312.
- BLISS, J.-P. & GILSON, R. D. (1998). Emergency signal failure : implications and recommendations. *Ergonomics*, 41, 57-72.

- BLOCH, H., CHEMAMA, R., GALLO, A., LECONTE, P., LE NY, J.-F., POSTEL, J., MOSCOVICI, S., REUCHLIN, M. et VURPILLOT, E. (1991). *Grand dictionnaire de la psychologie*. Paris : Larousse.
- BLOCKEY, P. N. & HARTLEY, L. R. (1995). Aberrant driving behaviour : errors and violations. *Ergonomics*, 38, 1759-1771.
- BOLLON, T. & CHANNOUF, A. (1993). Travail sur machine-outil et activité de planification. Actes du colloque de prospective : *Recherches pour l'Ergonomie*. Université de Toulouse-le-Mirail.
- BOLLON, T. (1991). *Essai de modélisation du fonctionnement cognitif de l'opérateur : le cas des machines outils conventionnelle et à commande numérique*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble II.
- BOOTH, P. A. (1991). Errors and theory in human-computer interaction. *Acta Psychologica*, 78, 69-96.
- BOREHAM, N. C. (1994) The dangerous practice of thinking. *Medical Education*, 28, 172-179.
- BOREHAM, N. C. & PATRICK, J. (1996). Diagnosis and decision making in work situations. An introduction. *Le Travail Humain*, 59, 1-4.
- BOREHAM, N. C., FOSTER, R. W. & MAWER, G. E. (1992). Strategies and knowledge in the control of a chronic illness. *Le Travail Humain*, 55, 15-34.
- BOREHAM, N. C., MAWER, G. E. & FOSTER, R. W. (1996). Medical diagnosis from circumstantial evidence. *Le Travail Humain*, 59, 69-85.
- BOSHUIZEN, H. P. A. & SCHMIDT, H. (1992). On the role of biomedical knowledge in clinical reasoning by experts, intermediates and novices. *Cognitive Science*, 153-184.
- BOSHUIZEN, H. P. A., HOBUS, P. P. M., CUSTERS, E. J. F. M. & SCHMIDT, H. G. (1991). Cognitive effects of practical experience. in D. A. EVANS & V. L. PATEL (Eds) *Advanced models of cognition for medical training and practice*. Heidelberg : Springer Verlag. (pp. 337-348).
- BOTTING, R. M. & JOHNSON, C. W. (1998). A formal and structured approach to the use of task analysis in accident modeling. *International Journal of Human-Computer Studies*, 49, 223-244.
- BOUDES, N. & CELLIER, J.-M. (1998). Etude du champ d'anticipation dans le contrôle du trafic aérien. *Le Travail Humain*, 61, 29-50.
- BREHMER, B. & SVENMARK, P. (1995). Distributed decision making in dynamic environments : time scales and architectures of decision making. in J.-P. CAVERNI, M. BAR-HILLEL, F. H. BARRON & H. JUNGGERMANN (Eds) *Contributions to decision making-1*. Amsterdam : Elsevier Science.

- BREHMER, B. (1987). Development of mental models for decision in technological systems. in J. RASMUSSEN, K. DUNCAN & J. LEPLAT. (Eds) *New technology and human error*. Chichester, UK : Wiley.
- BREHMER, B. (1992). Dynamic decision making : human control of complex systems. *Acta Psychologica*, 81, 211-241.
- BREHMER, B. (1996). Man as a stabilizer of systems. From static snapshots of judgement processes to dynamic decision making. *Thinking and Reasoning*, 2, 225-238.
- BRENAC, T. & MEGHERBI, B. (1996). Diagnostic de sécurité routière sur une ville : intérêt de l'analyse fine de procédures d'accident tirées aléatoirement. *Recherche Transports Sécurité*, 52, 59-70.
- BRINKMAN, J. A. (1993). Verbal protocol analysis in fault diagnosis. *Ergonomics*, 11, 1381-1397.
- BROOKHUIS, K., DE WAARD, D. & MULDER, B. (1994). Measuring driving performance by car-following in trafic. *Ergonomics*, 37, 427-434.
- BROOKS, L. R., NORMAN, G. R. & ALLEN, S. W. (1991). Rôle of specific similarity in a medical diagnostic task. *Journal of Experimental Psychology : General*, 120, 278-287.
- BROWN, A. L. & KANE, M. J. (1988). Preschool children can learn to transfer : Learning to learn and learning from example. *Cognitive Psychology*, 20, 493-523.
- BUCHNER, A., FUNKE, J. & BERRY, D. C. (1995). Negative corrélations between control performance and verbalizable knowledge : Indicators for implicit learning in process tasks ? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48, 166-187.
- BUCHNER, A., FUNKE, J. (1993). Finite state automata : Dynamic task environments in problem-solving research. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 46, 83-118.
- BUFFET, J.-M. (1997). La philosophie de la check-list. *Info-Pilote*, 497, 60-64.
- Bureau of Air Safety Investigation (1997). *Faichild Aircraft model SA227-AC, VH-NEJ, Tamworth, NSW, 16 September 1995*. Investigation Report 9503057. Department of Transport and Regional Development.
- BYRNE, R. M. J. & HANDLEY, J. H. (1992). Reasoning strategies. *The Irish Journal of Psychology*, 13, 111-124.
- BYRNE, R. M. J. (1989). Human deductive reasoning. *The Irish Journal of Psychology*, 10, 216-231.
- BYRNE, R. M. J. (1991). Can valid inferences be suppressed ? *Cognition*, 39, 71-78.
- BYRNE, R. M. J., HANDLEY, J. H. & JOHNSON-LAIRD P. N. (1992). Advances in the psychology of reasoning : meta-deduction. in M. T. KEANE & K. J. GILHOOLY (Eds) *Advances in the Psychology of thinking, vol 1*. New York : Harvester Wheatsheaf.
- CACCIABUE, C. C. & KJAER-HANSEN, J. (1993). Cognitive modeling and human-machine interactions in dynamic environnements. *Le Travail Humain*, 56, 1-26.

- CACCIABUE, P. C. (1991). Cognitive ergonomics : a key issue for human-machine systems. *Le Travail Humain*, 54, 359-364.
- CARLSON, R. A. & YAURE, R. G. (1990). Practice schedules and the use of component skills in problem solving. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 16, 484-496.
- CATRAMBONE, R. & HOLYOAK, K. J.(1989). Overcoming contextual limitations on problem-solving transfer. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 15, 1147-1156.
- CAVERNI, J. P., NGUYEN-XUAN, A., HOC, J. M. & POLITZER, G. (1990). Les activités de diagnostic. in J. F. RICHARD, C. BONNET, & R. GHIGLIONE *Traité de Psychologie Cognitive 2. Le traitement de l'information symbolique*. Paris : Dunod.
- CAVERNI, J.-P. (1991). Psychological modeling of cognitive processes in knowledge assessment by experts : Some convergents issues with psychological modeling in medical reasoning. in D. A. EVANS & V. L. PATEL (Eds) *Advanced models of cognition for medical training and practice*. Heidelberg : Springer Verlag. (pp 245-254).
- CELLIER, J. M., EYROLLE, H. & MARINE, C. (1997). Expertise in dynamic systems. *Ergonomics*, 40, 28-50.
- CELLIER, J.-M., EYROLLE, H. & BERTRAND, A. (1995). Effects of age and level of experience on occurrence of accidents. *Perceptual and Motor Skills*, 80, 931-940.
- CHANG, S. J., DI CESARE, F. & GOLDBOGEN, G. (1991). Failure propagation trees for diagnosis in manufacturing systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 21, 767-776.
- CHANNOUF, A; & PICHEVIN, M.-F. (1998). *Le pouvoir subliminal. Influences non conscientes sur le comportement*. Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- CHAPPELL, S. L. (1994) Using voluntary incident reports for human factors evaluations. in N. JOHNSTON, N. McDONALD & R. FULLER *Aviation Psychology in Practice*. Ashgate Publishing Company.
- CHASE, W. G. & SIMON, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, 4, 55-81
- CHEN, J. S. & SRIHARI, S. N. (1994). Generalized split-half search for model-based diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 24, 1412-1416.
- CHRISTOL, J. & MAZEAU, M. (1991). Ergonomie cognitive : pléonasme ou paradoxe ? *Le Travail Humain*, 54, 381-390.
- CLARK, D. A., FOX, J., GLOWINSKI, A. J. & O'NEIL, M. J. (1990). Symbolic reasoning for decision making. in K. BORCHERDING, O. I. LARICHEV & D. M. MESSIK (Eds) *Contemporary issues in decision making*. North Holland : Elsevier Science.

- CLEEREMANS, A. & KARNAS, G. (1988). Application de l'étude typologique à l'étude de la performance lors d'un apprentissage. *Cahiers de Psychologie Cognitive. European Bulletin of Cognitive Psychology*, 8, 95-103.
- COHEN, S. & BETTIOL, S. (1997). Une fusion d'algorithmes pour une meilleure détection des incidents routiers. *Recherche Transports Sécurité*, 55, 39-46.
- CUNY, X. (1979). Different levels of analysing process control tasks. *Ergonomics*, 22, 415-425.
- CUNY, X. (1993). Les variations en analyse du travail. . *Le Travail Humain*, 56, 233-241.
- CUSTERS, E. J. F., BOSCHUIZEN, H. P. A. & SCHMIDT, H. G. (1996). The influence of medical expertise, case typicality and illness script component on case processing and disease probability estimates. *Memory and cognition*, 24, 384-399.
- DALE, H. C. (1957). Fault-finding in electronic equipment. *Ergonomics*, 1, 356-385.
- DANSET, A. (1988) *Eléments de psychologie du développement*. Paris : Armand Colin.
- DAS, S. R., JONE, W. B. & WONG, K. L. (1990). Probability modeling and fault analysis in sequential logic using computer simulation. *IEEE Transactions on Systems, Mans and Cybernetics*, 20, 490-498.
- DAVIS, R. (1984). Diagnostic reasoning based on structure and behavior. *Artificial Intelligence*, 24, 247-410.
- De COURVILLE, B. (1994). Facteurs humains, CRM et sécurité des vols. *Pilote de ligne*, 2, 22-25.
- De COURVILLE, B. (1997). Retour d'expérience à Air France. *Bulletin d'information sur la Sécurité des Vols*, 38, 8-11.
- De KEYSER, V. & NYSSSEN, A. S. (1993). Les erreurs humaines en anesthésie. *Le Travail Humain*, 56, 243-266
- De KEYSER, V. (1991). Can we build a cognitive ergonomics ? *Le Travail Humain*, 54, 345-350.
- De KLEER, J. & WILLIAMS, B. C. (1987). Diagnosing multiple faults. *Artificial Intelligence*, 32, 97-130.
- De La GARZA, C. (1999). Fiabilité individuelle et organisationnelle dans l'émergence de processus incidentels au cours d'opérations de maintenance. *Le Travail Humain*, 62, 93-97.
- DECORTIS, F. & CACCIABUE, C. *Modélisation cognitive et analyse de l'activité*. Manuscrit.
- DECORTIS, F. (1993). Operator strategies in a dynamic environment in relation to an operator model. *Ergonomics*, 36, 1291-1304.
- DETIENNE, F. (1996). What models for program understanding? Actes du colloque *Using Complex Information*. Université de Poitiers (pp. 60-66).
- DIENES, Z. & FAHEY, R. (1995). Role of specific instances in controlling a dynamic system. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 21, 848-862.

- DOIREAU, P., WIOLAND, L. & AMALBERTI, R. (1995). La détection de l'erreur par un tiers en situation de pilotage d'avions. *Service de Santé des Armées. Travaux Scientifiques*, 16, 291-292.
- DOIREAU, P., WIOLAND, L. & AMALBERTI, R. (1997). La détection des erreurs humaines par des opérateurs extérieurs à l'action : le cas du pilotage d'avion. *Le Travail Humain*, 60, 131-153.
- DOWELL, J. (1995). Coordination in emergency operations and the tabletop training exercise. *Le Travail Humain*, 58, 85-102.
- DUBOIS, D. (1991). Sciences cognitives et ergonomie : effet de mode, enrichissement réciproque ou normalisation ? *Le Travail Humain*, 54, 351-357.
- DUBOIS, D. (1992). Connaissances et rationalités. Questions ergonomiques et recherches cognitives. *Intellectica*, 15, 7-26.
- DUNCAN, K. D. & GRAY, M. J. (1975). An evaluation of a fault training course for refinery process operators. *Journal of Occupational Psychology*, 48, 199-218.
- DUNCAN, K. D. (1985). Representation of fault-finding problems and development of fault-finding strategies. *Programmed Learning and Educational Technology*, 22, 125-131.
- DUPONT, M. (1994). Méthodologie pour un service de sécurité des vols. *Pilote de ligne*, 2, 14-16.
- ENDSLEY, M. & SMITH, R. P. (1996). Attention and decision making in tactical air combat. *Human Factors*, 38, 232-249.
- ENGLE, R. W., CARULLO, J. J. & COLLINS, K. W. (1991). Individual differences in working memory for comprehension and following directions. *Journal of Educational Research*, 84, 253-262.
- ERICSSON, K. A. & KINTSCH, W. (1995). Long term working memory. *Psychological Review*, 102, 211-245.
- ERICSSON, K. A. & STASZEWSKI, J. (1989). Skilled memory and expertise : Mechanisms of exceptional performance. in : D. KLAHR, & K. KOTOVSKY (Eds) *Complex Information Processing*. Hillsdale : Lawrence Erlbaum.
- EVANS, J. St B. T. (1993). The mental model theory of conditional reasoning : critical appraisal and revision. *Cognition*, 48, 1-20.
- FAR, B. H. & NAKAMICHI, M. (1993). Qualitative fault diagnosis in systems with nonintermittent concurrent faults : a subjective approach. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23, 14-30.
- FATH, J. L., MITCHELL, C. M. & GOVINDARAJ, T. (1990). An ICAI architecture for troubleshooting in complex dynamic systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20, 537-558.

- FINK, P. K. & LUSTH, J. C. (1987). Expert systems and diagnostic expertise in the mechanical and electrical domains. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 17, 340-349.
- FISHER, J. (1991). Defining the novice user. *Behaviour and Information Technology*, 10, 437-441.
- FISHWICK, P. A., NARAYANAN, N. H., STICKLEN, J. & BONARINI, A. (1994). A multimodel approach to reasoning and simulation. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 24, 1433-1449.
- FLEURY, D. (1992). Catégorisation de scènes routières et sécurité. De l'analyse des accidents aux représentations typiques. *Intellectica*, 15, 97-123.
- FLIN, R., SLAVEN, G. & STEWART, K. (1996). Emergency decision making in the offshore oil and gas industry. *Human Factors*, 38, 262-277.
- FOUET, J.-M. (1997). *Connaissances et savoir-faire en entreprise. Intégration et capitalisation*. Paris : Hermès.
- FRENCH, D. J., WEST, R. J., ELANDER, J. & WILDING, J. M. (1993). Decision-making style, driving style, and self-reported involvement in road traffic accidents. *Ergonomics*, 36, 627-644.
- FRENSCH, P. A., & STERNBERG, R. J. (1989). Expertise and intelligent thinking: When is it worse to know better? In R. J. STERNBERG (Ed.) *Advances in the psychology of human intelligence*. Hillsdale, NJ: Erlbaum (Vol. 5, pp. 157-188).
- GABA, D. (1991). Dynamic decision making in anesthesiology : Cognitive models and training approaches. in D. A. EVANS & V. L. PATEL (Eds) *Advanced models of cognition for medical training and practice*. Heidelberg : Springer Verlag (pp 123-147).
- GENDRE, H. (1995). Enquête-accident : Vers une nouvelle ère. *Pilote de ligne*, 5, 6-7.
- GENTNER, D. R. (1988). Expertise in typewriting. in M. T. H. CHI, R. GLASER & M. J. FARR *The nature of expertise*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum (pp 1-21).
- GERDSMEIER, T., LADKIN, P. B. & LOER, K. (1997). *Formalising Failure Analysis*.
<http://www.rvs.uni-bielefeld.de/~ladkin/Reports/AMAST97.html>
- GETZ, I. (1996a). La reconnaissance et la mémoire : l'essence de l'expertise échiquienne. In *L'expertise cognitive aux échecs*. Paris : PUF.
- GETZ, I. (1996b). La mémoire et la performance chez l'expert aux échecs. In *L'expertise cognitive aux échecs*. Paris : PUF.
- GIBSON, F. P., FICHMAN, M. & PLAUT, D. C. (1997). Learning in dynamic decision tasks : computational model and empirical evidence. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 71, 1-35.

- GICK, M. L. & Mc GARRY S. J. (1992). Learning from mistakes : inducing analogous solution failures to a source problem produces later successes in analogical transfer. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 623-639.
- GITUS, J. H. (1988). *The Chernobyl accident and its consequences*. London : United Kingdom Atomic Energy Authority.
- GOBET, F. & SIMON, H. A. (1996a). Recall of random and distorted chess positions : Implications for the theory of expertise. *Memory and Cognition*, 24, 493-503.
- GOBET, F. & SIMON, H. A. (1996b). Templates in chess memory : a mechanism for recalling several boards. *Cognitive Psychology*, 31, 1-40.
- GOBET, F. (1993). *Les mémoires d'un joueur d'échecs*. Fribourg : Editions Universitaires Fribourg Suisse.
- GOLDBECK, R. A., BERNSTEIN, B. B., HILLIX, W. A. & MARX, M. H. (1957). Application of the half-split technique to problem solving tasks. *Journal of Experimental Psychology*, 53, 330-338.
- GOVINDARAJ, T. & SU, Y. D. (1988). A model of fault diagnosis performance of expert marine engineers. *International Journal of Man-Machine Studies*, 29, 1-20.
- GRANT, S. (1997). Cognitive architecture for, modeling human error in complex dynamic tasks. *Le Travail Humain*, 60, 363-385.
- GREANEY, J. & Mc RAE, A. N. (1996). Diagnosis of fault location using polygon displays. *Ergonomics*, 39, 400-411.
- GREEN, H. P. (1981). Lessons of Three Mile Island for the institutional management and regulation of nuclear power. In T. H. MOSS & D. L. SILLS (Eds) *The Three Mile Island Accident : Lessons and Implications*. New York : The New York Academy of Sciences.
- GREEN, T. R. G. & HOC, J. M. (1991). What is cognitive Ergonomics ? *Le Travail Humain*, 54, 291-304.
- GUILLEVIC, C. (1991). Les conduites de travail. in C. GUILLEVIC *Psychologie du travail*. Paris : Nathan.
- HALPERN, D. F. (1990). Models of cognitive processing : a single flexible workspace or a distributed process? Comments on Carlson, Khoo, Yaure and Schneider. *Journal of Experimental Psychology : General*, 119, 311-332.
- HARDIMAN, P. T., DUFRESNE, R. & MESTRE, J. (1989). The relation between problem categorization and problem solving among experts. *Memory and Cognition*, 17, 627-638.
- HASSEBROK, F. & PRIETULA, M. J. (1992). A protocol-based coding scheme for the analysis of medical reasoning. *International Journal of Man-Machine Studies*, 37, 613-652.

- HASSEBROK, F., JOHNSON, P. E., BULLEMER, P., FOX, W. & MOLLER, J. H. (1993). When less is more : representations and selective memory in expert problem solving. *American Journal of Psychology*, 106, 155-189.
- HECHT, H. & PROFFIT, D. R. (1995). The price of expertise. Effects of experience on the water-level task. *Psychological Science*, 6, 90-95.
- HELFRICH, H. (1999). Human reliability from a social-psychological perspective. *International Journal of Human-Computer Studies*, 50, 193-212.
- HOC, J.-M. & AMALBERTI, R. (1994). Diagnostic et prise de décision dans les situations dynamiques. *Psychologie Française*, 39, 177-192.
- HOC, J.-M. & AMALBERTI, R. (1995). Diagnosis : some theoretical questions raised by applied research. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 14, 73-101.
- HOC, J.-M. (1989). Strategies in controlling a continuous process with long response latencies : needs for a computer support to diagnosis. *International Journal of Man-Machine Studies*, 30, 47-67.
- HOC, J.-M. (1993). Conditions méthodologiques d'une recherche fondamentale en psychologie ergonomique et validité des résultats. . *Le Travail Humain*, 56, 171-184.
- HOC, J.-M. (1996). *Supervision et contrôle de processus. La cognition en situation dynamique*. PUG. Grenoble.
- HOC, J.-M. (1991). Effets de l'expertise des opérateurs et de la complexité de la situation dans la conduite d'un processus continu à long délai de réponse : le haut fourneau. *Le Travail Humain*, 54, 225-249.
- HOLYOACK, K. J. (1990) Problem solving. in D. OSHERSON & E. E. SMITH (Eds) *An invitation to cognitive science. Vol 3 : Thinking*. Cambridge, MA : MIT Press.
- HOUSIAUX, A. *La nature de l'expertise chez l'ingénieur et chez l'opérateur dans une situation de conduite d'une unité de production électrique*. Manuscrit.
- HUNT, E. (1992). Why is it hard to improve mental competence ? *Advances in Cognitive and Educational Practice*, 1A, 3-24.
- JAFFE, L. (1981). Technical aspects and chronology of the Three Mile Island accident. In T. H. MOSS & D. L. SILLS (Eds) *The Three Mile Island Accident : Lessons and Implications*. New York : The New York Academy of Sciences.
- JANSSON, A. (1995). Strategies in dynamic decision making : does teaching heuristic strategies by instructions affect performance ? in J.-P. CAVERNI, M. BAR-HILLEL, F. H. BARRON & H. JUNGGERMANN (Eds) *Contributions to decision making - 1*. Amsterdam : Elsevier Science.

- JANZEN, M. E. & VICENTE, K. J. (1998). Attention allocation in the abstraction hierarchy. *International Journal of Human-Computer Studies*, 48, 521-545.
- JOBLET, L. (1997). *Approches de conduite du nucléaire et répartition des tâches entre opérateurs*. Rapport de stage. Université de Provence.
- JOHNSON, C. W. (1997). The epistemics of accidents. *International Journal of Human-Computer Studies*, 47, 659-688.
- JOHNSON, C. W., MC CARTHY, J. C. & WRIGHT, P. C. (1995). Using a formal language to support natural language in accidents reports. *Ergonomics*, 38, 1264-1282.
- JOHNSON, P. E., GRAZIOLI, S., JAMAL, K. & ZUALKERNAN, I. A. (1992). Success and failure in expert reasoning. *Organisational Behavior and Human Decision Processes*, 53, 173-203.
- JOHNSON, W. B. & ROUSE, W. R. (1982a). Analysis and classification of human errors in troubleshooting live aircraft power plants. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 12, 389-393.
- JOHNSON, W. B. & ROUSE, W. R. (1982b). Training maintenance technicians for troubleshooting : two experiments with computer simulations. *Human Factors*, 24, 271-276.
- JOHNSON-LAIRD P. N. (1993). La théorie des modèles mentaux. In M.-F. EHRLICH, H. TARDIEU & M. CAVAZZA *Les modèles mentaux. Approche cognitive des représentations*. Paris : Masson.
- JOHNSON-LAIRD P. N., BYRNE, R. M. & SCHAEKEN, W. (1992). Propositional reasoning by models. *Psychological Review*, 99, 418-439.
- KAEMPF, G. L., KLEIN, G., THORDSEN, M. L. & WOLF, S. (1996). Decision making in complex naval command and control environments. *Human Factors*, 38, 220-231.
- KAHNEMAN, D. & TVERSKY, A. (1972). Subjective probability : a judgement of representativeness. *Cognitive Psychology*, 3, 430-454.
- KARNAS, G. & VAN DE LEEMPUT C. (1990). L'ergonomie de conception du dialogue homme-ordinateur. Généralité et relativité des résultats. *Le Travail Humain*, 53, 303-311.
- KEMENY, J. G. (1981). *The President's commission on the accident at Three Mile Island*. New York : Pergamon Press.
- KERSHOLT, J. (1995). Decision making in a dynamic situation : The effects of faulse alarms and time pressure. *Journal of Behavioral Decision Making*, 8, 181-200.
- KERSHOLT, J. H., PASSENIER, P. O., HOUTTUIN, K. & SCHUFFEL, H. (1996). The effect of a priori probability and complexity on decision making in a supervisory control task. *Human Factors*, 38, 65-78.

- KIERAS, D. (1992). Diagrammatic displays for engineered systems : effects on human performance in interacting with malfunctioning systems. *International Journal of Man-Machine Studies*, 861-895.
- KIM, J. W., WEISTROFFER, H. R. & REDMOND, R. T. (1993). Expert systems for bond rating : a comparative analysis of statistical rule-based and neural networks systems. *Expert systems*, 10, 167-172.
- KLAYMAN, J. & HA Y.-W. (1989). Hypothesis testing in rule discovery : Strategy, structure and content. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 5, 596-604.
- KONRADT, U. (1995). Strategies of failure diagnosis in computer-controlled manufacturing systems : empirical analysis and implications for the design of adaptive decision support systems. *International Journal of Human-Computer Studies*, 43, 503-521.
- KRUYSSSE, H. W. (1992). How slips result in traffic conflicts and accidents. *Applied Cognitive Psychology*, 6, 607-618.
- KUIPERS, B. & KASSIRER, J. P. (1984). Causal reasoning in medecine : analysis of a protocol. *Cognitive Science*, 363-385.
- LADKIN, P. B. (1996). *Extracts from UK AAIB Report 4/90 on the 8 January 1989 accident of a British Midland B737-400 at Kegworth, Leicestershire, England.* <http://www.rvs.uni-bielefeld.de/~ladkin/Incidents/Kegworth/kegworth-ladkin.html>
- LAFLAMME, L. & CLOUTIER, E. (1991). Processus de production et sécurité du travail. Une étude exploratoire des risques d'accidents intra-entreprise dans le secteur des scieries. *Le Travail Humain*, 54, 43-55.
- LAMARSH, J. R. (1981). Safety considerations in the design and operation of light water nuclear power plants. In T. H. MOSS & D. L. SILLS (Eds) *The Three Mile Island Accident : Lessons and Implications*. New York : The New York Academy of Sciences.
- LAUGHERY, K. R. & WOGALTER, M. S. (1997). Warnings and risk perception. In G. SALVENDY (Ed.) *Design for health and safety*. New York : Wiley and Sons.
- LAVILLE, A. (1991). L'ergonomie cognitive peut-elle exister ? *Le Travail Humain*, 54, 379, 380.
- LAWTON, R. & PARKER, D. (1998). Individual differences in accident liability : A review and integrative approach. *Human Factors*, 40, 655-671.
- LECOUFLE, J.-C. & RIOUT, J. (1997). AMDEC machine. *Travail et Méthodes*, 531, 29-37.
- LEE, S. C. (1994). Sensor validation based on systematic exploration of the sensor redundancy for fault diagnosis knowledge based systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 24, 594-605.
- LEMAIRE, P. (1999). *Psychologie cognitive*. Paris : De Boeck.

- LEONARD, F. (1988). Les conditions d'acquisition d'une nouvelle connaissance. *Revue Française de Pédagogie*, 82, 39-46.
- LEPLAT, J. (1987). Some observations on error analysis. in J. RASMUSSEN, K. DUNCAN & J. LEPLAT. (Eds) *New technology and human error*. Chichester, UK : Wiley & Sons Ltd.
- LEPLAT, J. (1991). Compétence et ergonomie. in R. AMALBERTI, M. DE MONTMOLLIN & J. THEUREAU *Modèles en analyse du travail*. Liège : Mardaga (pp. 263-278).
- LESGOLD, A., GLASER, R., RUBINSON, H., KLOPFER, D., FELTOVITCH, P. & WANG, Y. (1988). in M. T. H. CHI, R. GLASER & M. J. FARR *The nature of expertise*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum (pp 310-342).
- LEVI-LEBOYER, C. & SPERANDIO J.-C. (1987). La psychologie du travail en France. Naissance et développement. in C. LEVI-LEBOYER & J.-C. SPERANDIO *Traité de psychologie du travail*. Paris : PUF (pp. 9-18).
- LIFE, M. A., BARBER, P. & EDWORTHY, J. (1996). Back to the future : Cognitive ergonomics six years on. *Ergonomics*, 39, 341-344.
- LIU, X. (1991). Hypotheses testing by fundamental knowledge. *International Journal of Man-Machine Studies*, 35, 409-427.
- LOGAN, G. D. (1989). Automaticity and cognitive control. in J. S. ULEMAN & J. A. BARGH (Eds) *Unintended thought*. New York : Guilford Press (pp 52-74).
- LOPES, L. L. (1987). Between hope and fear : the psychology of risk. *Avances in Experimental Social Psychology*, 20, 255-295.
- LOWE, R. K. (1996). Background knowledge and the construction of a situational representation from a diagram. *European Journal of Psychology of Education*, 11, 377-397.
- LUC, F., MARESCAUX, P.-J. & KARNAS, G. (1989). Modes d'apprentissage implicite et explicite dans une tâche de contrôle dynamique : Influence des traits de surface du système et d'une information donnée dans la consigne. *L'année Psychologique*, 89, 489-512.
- LUCAS, D. A. (1987). New technology and decision making. in J. RASMUSSEN, K. DUNCAN & J. LEPLAT. (Eds) *New technology and human error*. Chichester, UK : Wiley & Sons Ltd.
- LUTZ, J., MEANS, L. W. & LONG, T. E. (1994). Where did I park ? A naturalistic study of spatial memory. *Applied Cognitive Psychology*, 8, 439-451.
- MARESCAUX, P.-J., LUC, F. & KARNAS, G. (1989). Modes d'apprentissage sélectif et non sélectif et connaissances acquises au contrôle d'un processus : évaluation d'un modèle simulé. *Cahiers de Psychologie Cognitive. European Bulletin of Cognitive Psychology*, 9, 239-264.
- MARINE, C. & VALOT, C. (1993). La variabilité : un défi à l'ergonomie. Actes du Colloque de Prospective : *Recherches pour l'Ergonomie*. Université de Toulouse-Le-Mirail.

- MARRETT, C. B. (1981). The accident at Three Mile Island and the problem of uncertainty. In T. H. MOSS & D. L. SILLS (Eds) *The Three Mile Island Accident : Lessons and Implications*. New York : The New York Academy of Sciences.
- McKENZIE, C. R. M. (1998). Taking into account the strength of an alternative hypothesis. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 24, 771-792.
- MEDIN, D. L., ALTOM, M. W., EDELSON, S. M. & FREKO, D. (1982). Correlated symptoms and simulated medical classification. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 8, 37-50.
- MEISTER, A. & LAUR, U. (1997). *Final report on the capsizing on 28 September 1994 in the Baltic sea of the ro-ro passenger vessel MV ESTONIA*. <http://president.ee/report/>
- MILLER, G. A. (1956). The magical number seven plus or minus two : Some limits on our limits for processing information. *Psychological Review*, 63, 81-97.
- MILNE, R. (1987). Strategies for diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 17, 333-339.
- Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme (1993). *Rapport de la commission d'enquête sur l'accident survenu le 20 Janvier 1992 près du mont Sainte Odile à l'Airbus A.320 immatriculé F-GGED exploité par la compagnie Air Inter*.
- MINSKY, M. (1975). *La société de l'esprit*. Paris : Interéditions.
- MOZETIC, I. (1991). Hierarchical model-based diagnosis. *International Journal of Man-Machine Studies*, 35, 329-362.
- MUMMA, G. H. (1993). Categorization and rule induction in clinical diagnosis and assessment. *The Psychology of Learning and Motivation*, 29, 283-326.
- MUNLEY, G. & PATRICK, J. (1997). Training and transfer of a structural fault-finding strategy. *Ergonomics*, 40, 92-109.
- National Transportation Safety Board (1996). *Runway departure during attempted takeoff, Tower Air flight 41, Boeing 747-136, N605FF, JFK international airport, New York, December 20, 1995*. <http://www.nts.gov/Publictn/1996/AAR9604.pdf>
- National Transportation Safety Board (1997). *Wheels-up landing, Continental Airlines flight 1943, Douglas DC-9 N10556, Houston, Texas, February 19, 1996*. <http://www.nts.gov/Publictn/1997/AAR9701.pdf>
- NEWELL, A. & SIMON, H. A. (1972). *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs. : Prentice-Hall.
- NGUYEN-XUAN, A., RICHARD, J.-F. & HOC, J.-M. (1990) Le contrôle de l'activité. in J. F. RICHARD, C. BONNET, & R. GHIGLIONE *Traité de Psychologie Cognitive 2. Le traitement de l'information symbolique*. Paris : Dunod.

- NOOTEBOOM, P. & LEEMEIJER, G. B. (1993). Focusing based on the structure of a model in model-based diagnosis. *International Journal of Man-Machine Studies*, 38, 455-474.
- NORMAN, D. A. (1985). Some observations on mental models. In D. GENTNER & A. L. STEVENS *Mental models*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- NORMAN, G. R., BROOKS, L. R. & ALLEN, S. W. (1989). Recall by expert medical practionners and novices as a record of processing attention. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory and Cognition*, 15, 1166-1174.
- NOVICK, L. R. & HOLYOACK, K. J. (1991). Mathematical problem solving by analogy. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 17, 338-415.
- NOVICK, L. R. (1988). Analogical transfer, problem similarity, and expertise. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 14, 510-520.
- NOVICK, L. R. (1990). Representational transfer in problem solving. *Psychological Science*, 1, 128-132.
- OCHANINE, D. (1978). Le rôle des images opératives dans la régulation des activités de travail. *Psychologie et Education*, 2, 63-72.
- O'HARE, B. A. (1990). Pilot's perception of risks and hazards in general aviation. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 61, 599-603.
- O'HARE, D., WIGGINS, M., BATT, R. & MORRISON, D. (1994). Cognitive failure analysis for aircraft accident investigation. *Ergonomics*, 37, 1855-1869.
- OHLSSON, S. (1993). Abstract schemas. *Educational Psychologist*, 28, 51-66.
- OHLSSON, S. (1996). Learning from performance errors. *Psychological Science*, 103, 241-262.
- PARKER, D., REASON, J. T., MANSTEAD, S. R. & STRADLING, S. G. (1995). Driving errors, driving violations and accident involvement. *Ergonomics*, 38, 1036-1048.
- PASCOE, E. & PIDGEON, N. (1995). Risk orientation in dynamic decision making. in J.-P. CAVERNI, M. BAR-HILLEL, F. H. BARRON & H. JUNGGERMAN (Eds) *Contributions to decision making - 1*. Amsterdam : Elsevier Science.
- PATRICK, J. (1993). Cognitive aspects of fault-finding training and transfer. *Le Travail Humain*, 56, 187-209.
- PATRICK, J., GREGOV, A., HALLIDAY, P., HANDLEY, J. & O'REILLY, S. (1999). Analysing operator's diagnostic reasoning during multiple events. *Ergonomics*, 42, 493-515.
- PATRICK, J., JAMES, N. & FRIEND, C. (1996). A field study of fault-finding. *Le Travail Humain*, 59, 23-44.
- PATTIPATI, K. & ALEXANDRIDIS, M. G. (1990). Application of heuristic search and information theory to sequential fault diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 24, 872-887.

- PAZZANI, M. J. (1987). Failure-driven learning of fault diagnosis heuristics. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 17, 380-394.
- PENG, Y. & REGGIA, J. A. (1989). A connectionist model for diagnostic problem solving. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 19, 285-298.
- PENG, Y. & REGGIA, J. A. (1990) *Abductive inference models for diagnostic problem solving*. New York : Springer-Verlag.
- PERRARD, G. & MARTEGOUTTE, G. (1995). L'analyse des vols. *Pilote de ligne*, 5, 30-33.
- PERRUCHET, P. (1997). Le rôle de l'attention dans les apprentissages implicites. In *Attention et contrôle cognitif*. Rouen : Publications de l'Université de Rouen (pp. 19-27).
- POSNER, M. I. (1988). What is to be an expert ? in M. T. H. CHI, R. GLASER & M. J. FARR *The nature of expertise*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum.
- PUPPE, F. (1998). Knowledge reuse among diagnostic problem-solving methods in the Shell-Kit D3. *International Journal of Human-Computer Studies*, 49, 627-649.
- RAAJMAKERS, J. & VERDUYN, W. (1996). Individual differences and the effects of an information aid in performance of a diagnosis task. *Ergonomics*, 39, 966-979.
- RABARDEL, P. (1995). *Les hommes et les technologies*. Paris : Armand Colin.
- RAM, A., NARAYANAN, S. & COX, M. T. (1995). Learning to trouble-shoot : multistrategy learning of diagnostic knowledge for a real-word problem-solving task. *Cognitive Science*, 19, 289-340.
- RAME, J.-M. (1995). Rôle des industriels dans la prévention des accidents. *Pilote de ligne*, 5, 20-21.
- RANDEL, J. M. & PUGH, H. L. (1996). Differences in expert and novice situation awareness in naturalistic decision making. *International Journal of Human-Computer Studies*, 45, 579-587.
- RASMUSSEN, J. & JENSEN, A. (1974). Mental procedures in real life tasks. A case study in electronics trouble shooting. *Ergonomics*, 17, 293-307.
- RASMUSSEN, J. (1986). Information processing and human-machine interaction. North Holland : Elsevier Science.
- RASMUSSEN, J. (1991). Technologie de l'information et analyse de l'activité cognitive. in R. AMALBERTI, M. DE MONTMOLLIN & J. THEUREAU *Modèles en analyse du travail*. Liège : Mardaga (pp. 49-73).
- RASMUSSEN, J. (1993a). Diagnostic reasoning in action. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23, 981-992.
- RASMUSSEN, J. (1993b). Analysis of tasks, activities and work in the fiels and in laboratories. *Le Travail Humain*, 56, 133-155.

- RASMUSSEN, N. C. (1981). Methods of hazard analysis and nuclear safety engineering. In T. H. MOSS & D. L. SILLS (Eds) *The Three Mile Island Accident : Lessons and Implications*. New York : The New York Academy of Sciences.
- REASON, J. (1987a). A framework for classifying errors. in J. RASMUSSEN, K. DUNCAN & J. LEPLAT (Eds) *New technology and human error*. Chichester, UK : Wiley & Sons Ltd.
- REASON, J. (1987b). A preliminary classification of mistakes. in J. RASMUSSEN, K. DUNCAN & J. LEPLAT. (Eds) *New technology and human error*. Chichester, UK : Wiley & Sons Ltd.
- REASON, J. (1987c) Chernobyl errors. *Bulletin of the British Psychological Society*, 40, 201-206.
- REASON, J. (1990). L'erreur humaine. Paris : PUF. Traduction de *Human error*. Cambridge : Cambridge University Press.
- REASON, J. (1995). A systems approach to organized error. *Ergonomics*, 38, 1708-1721.
- REED, N. E. & JOHNSON, P. E. (1993). Analysis of expert reasoning in hardware diagnostic. *International Journal of Man-Machine Studies*, 38, 251-280.
- Report of the Presidential Comission on the Space Shuttle Challenger Accident (1986). Washington, DC : Government Printing Agency.
- REY, P. & BOUSQUET, A. (1995). Compensation for occupational injuries and diseases : Its effects upon prevention at the workplace. *Ergonomics*, 38, 475-486.
- RICHARD, J. F. (1990). Les activités mentales. Paris : PUF.
- RICHARD, J. F. (1995). Le contrôle de l'activité. in R. GHIGLIONE & J.-F. RICHARD *Cours de Psychologie. Processus et Applications*. Paris : Dunod (pp. 414-438).
- RICHARD, J.-F. (1997). Attention, contrôle et gestion des ressources. in D. MELLIER & A. VOM HOFFE. *Attention et contrôle cognitif*. Rouen : Université de Rouen (pp. 16-37).
- RIZZO, A., FERRANTE, D. & BAGNARA, S. (1995). Handling human error. in J.-M. HOC, P. C. CACCIABUE & E. HOLLNAGEL (Eds) *Expertise and technology. Cognition and human computer interaction*. Hillsdale, N.J. : Lawrence Erlbaum.
- ROBBINS, T.W., ANDERSON, E. J., BARKER, D. R., BRADLEY, A. C., FEARNYHOUGH, C., HENSON, R., HUDSON, S. R. & BADDELEY, A. D. (1996). Working memory in chess. *Memory and Cognition*, 24, 83-93.
- ROEDIGER III, H. L. (1980). Memory metaphors in cognitive Psychology. *Memory and Cognition*, 8, 231-246.
- ROSENBLATT, F. (1962). *Principles of neurodynamics : Perceptron and the theory of brain dynamics*. New York : Spartan Books.
- ROSSANO, M. J. & MORRISON, T. T. (1996). Learning from maps : General processes and map structure influence. *Cognition and Instruction*, 14, 109-137.

- ROUCAIROL, C. *La recherche opérationnelle*. Manuscrit.
- ROUSE, W. B. & ROUSE, S. H. (1979a). Measures of complexity in fault diagnosis tasks. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 9, 720-727.
- ROUSE, W. B. (1978). Human problem solving performance in a fault diagnosis task. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 8, 258-271.
- ROUSE, W. B. (1979b). Problem solving performance of maintenance trainees in a fault diagnosis task. *Human Factors*, 21, 195-203.
- ROUSE, W. B., ROUSE, S. H. & PELLEGRINO, S. J. (1980). A rule-based model of human problem solving performance in fault diagnosis tasks. *IEEE Transaction on Sytems, Man and Cybernetics*, 10, 366-376.
- SALLMINEN, S. & TALLBERG, T. (1996). Human errors in fatal and serious occupational accidents in Finland. *Ergonomics*, 39, 980-988.
- SAMURCAY, R. & HOC, J. M. (1996). Causal versus topographical support for diagnosis in a dynamic situation. *Le Travail Humain*, 59, 45-68.
- SANDERSON, P. M. & MURTAGH, J. M. (1990). Predicting fault diagnosis performance : why are some bugs hard to find ? *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20, 274-283.
- SANDERSON, P. M. (1990). Knowledge acquisition and fault diagnosis : experiments with PLAULT. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20, 255-242.
- SCARL, E. A., JAMIESON, J. R. & DELAUNE, C. I. (1987). Diagnosis and sensor validation through knowledge of structure and function. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 17, 360-368.
- SCHAAFSTAL, A. (1993). Knowledge and strategies in diagnostic skill. *Ergonomics*, 36, 1305-1316.
- SCHANK, R. C. & SZEGO, S. (1999). Quand faire, c'est taire. *Sciences Humaines*, HS 24, 76-78.
- SCHANTEAU, J. (1992). Competence in experts : The role of tasks characteristics. *Organisational Behavior and Human Decision Processes*, 53, 252-266.
- SCHAUBLE, L., GLASER, R., RAGHAVAN, K. & REINER, M. (1992). The integration of knowledge and experimentation strategies in understanding a physical system. *Applied Cognitive Psychology*, 6, 321-343.
- SCHRAAGEN, J. M. & SCHAAFSTAL, A. M. (1996). Training of systematic diagnosis : A case study in electronics troubleshooting. *Le Travail Humain*, 59, 5-21.
- SCHRAAGEN, J. M. (1993). How experts solve a novel problem in experimental design. *Cognitive Science*, 17, 285-309.
- SCHUNN, C. D. & DUNBAR, K. (1996). Priming, analogy and awareness in complex reasoning. *Memory and Cognition*, 24, 271-284.

- SCHYNS, P. G. (1998). Diagnostic recognition : task constraints, object information and their interactions. *Cognition*, 67, 147-179.
- SHANK, R. C. & ABELSON, R. (1977). *Scripts, plans, goals and understanding*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum.
- SIMON, H. A. (1995). The information-processing theory of mind. *American Psychologist*, 50, 507-508.
- SIMPSON, S. A. & GILHOOLY, K. J. (1997). Diagnostic thinking processes : evidence from a constructive interaction study of electrocardiogram (ECG) interpretation. *Applied Cognitive Psychology*, 11, 543-554.
- SIVAK, M. & FLANNAGAN, M. (1993). Fast-rise brake lamp as a collision-prevention device. *Ergonomics*, 36, 391-395.
- SMITH M. U. (1992). Expertise and the organization of knowledge : unexpected differences among genetic conselors, faculty, and students on problem categorization tasks. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 179-205.
- SMITH, E. E. & SLOMAN, S. A. (1994). Similarity versus rule-based categorization. *Memory and Cognition*, 22, 377-386.
- SOLOWAY, E., ADELSON, B. & EHRLICH, K. (1988). Knowledge and processes in the comprehension of computer programs. in M. T. H. CHI, R. GLASER & M. J. FARR *The nature of expertise*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum.
- SPERANDIO, J.-C. (1987). Les aspects cognitifs du travail. in C. LEVI-LEBOYER & J.-C. SPERANDIO *Traité de psychologie du travail*. Paris : PUF (pp. 646-658).
- SPERANDIO, J.-C. (1988). *L'ergonomie du travail mental*. Paris : Masson.
- SPERANDIO, J.-C. (1995). L'ergonomie cognitive : améliorer les aspects cognitifs du travail humain. *Psychologie Française*, 40, 3-11.
- STARR, C. (1981). The Three Mile Island accident : the other lesson. In T. H. MOSS & D. L. SILLS (Eds) *The Three Mile Island Accident : Lessons and Implications*. New York : The New York Academy of Sciences.
- SU, Y. & GOVINDARAJ, T. (1986). Fault diagnosis in a large dynamic system : experiments on a training simulator. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 16, 129-141.
- SUNDSTROM, G. A. (1993). Towards models of tasks and task complexity in supervisory control applications. *Ergonomics*, 11, 1413-1423.
- SUNDSTROM, G. A. (1995). Process of decision making : an approach for analysis of human-machine interactions in dynamic environments. *International Journal of Man-Machine Interactions*, 35, 843-858.

- SVENSON, O. (1990). Some propositions for the classification of decision situations. in K. BORCHERDING, O. I. LARICHEV & D. M. MESSIK (Eds) *Contemporary issues in decision making*. North Holland : Elsevier Science.
- TIBERGHIE, G. (1996) Le connexionnisme : stade suprême du béhaviorisme? In V. RIALLE & FISELLE (Eds) *Penser l'esprit*. Grenoble : PUG (pp. 27-41).
- TIJUS, C., RICHARD, J.-F. & LEPROUX, C. (1996). Une méthode de pronostic des erreurs et des incidents pour la conception de dispositifs. *Le Travail Humain*, 59, 355-376.
- TODD, P. A. & BENSABAT, I. (1994). The influence of decision aids on choice strategies under conditions of high cognitive load. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 24, 537-547.
- Transportation Safety Board of Canada (1995). *Near collision with building. Provincial Airlines LTD. Swearingen SA226 AT Merlin C-GTMW, Sydney, Nova Scotia. 14 April 1994. Report number A94A0124*. <http://www.bst-tsb.gc.ca/air/ea94a0078.html>
- USSR State comitee on the utilization of atomic energy (1986). The accident at the Chernobyl' nuclear power plant and its consequences. Information compiled for the *IAEA Experts' Meeting*, 25-29 August, Vienna. (pp. 1-13).
- VAN ELSLANDE, P. (1992). Les erreurs d'interprétation en conduite automobile : mauvaise catégorisation ou activation erronée de schémas ? *Intellectica*, 15, 125-149.
- VAN SCHIE, E. C. M. & VAN DER PLIGT, J. (1990). Influence diagrams and fault trees : The role of salience and anchoring. in K. BORCHERDING, O. I. LARICHEV & D. M. MESSIK (Eds) *Contemporary issues in decision making*. North Holland : Elsevier Science.
- VANDERMISSEN, M.-H., POULIOT, M. & MORIN, D. R. (1996). Comment estimer la sécurité d'un site d'accident : état de la question. *Recherche Transports Sécurité*, 51, 49-60.
- VARELA, F. (1989). *Connaître les sciences cognitives. Tendances et perspectives*. Paris : Seuil.
- VENDA, V. F., STISHKOVSKAYA, N. N., DROMEY, I. R. & LALIBERTE, T. G. (1994). Experimental studies of control problem solving processes using a graphic mnemonic display. *Ergonomics*, 37, 1709-1727.
- VERLUT, I. & KOENIG, O. (1997). Mémoire et attention dans les tâches de réaction sériel. in D. MELLIER & A. VOM HOFE *Attention et contrôle cognitif*. Rouen. Université de Rouen (pp. 29-37).
- VESSEY, I. (1985). Expertise in debugging computer programs : an analysis of the content of verbal protocols. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 16, 621-637.
- VEYRAC, H., CELLIER, J.-M. & BERTRAND, A. (1997). Modèle de l'opérateur et modèle du prescripteur. Le cas des consignes de résolution de situations incidentelles pour les conducteurs de trains. *Le Travail Humain*, 60, 387-407.

- VICENTE, K. J. (1992). Memory recall in a process control system : A measure of expertise and display effectiveness. *Memory and Cognition*, 20, 356-373.
- VILLIERS, J. (1994). Pour une discipline à part entière : l'humanique. *Pilote de ligne*, 2, 26.
- VISSER, W. (1988). L'activité de comparaison de représentations dans la mise au point de programmes. *Le Travail Humain*, 51, 353-362.
- WAGEMANN, L. (1998). Analyse des représentations initiales liées aux interactions homme-machine en situation de conduite simulée. *Le Travail Humain*, 61, 129-151.
- WAGENAAR, W. A. (1990). Risk evaluation and the causes of accidents. in K. BORCHERDING, O. I. LARICHEV & D. M. MESSIK (Eds) *Contemporary issues in decision making*. North Holland : Elsevier Science.
- WANNER, J.-C. (1998). Le retour d'expérience, ce n'est ni accuser ni excuser mais expliquer. *Navigants*, 9, 4-15.
- WEBER, E. U., BÖCKENHOLT, U., HILTON, D. & WALLACE, B. (1993). Determinants of diagnosis generation : Effects of information, base rates and experience. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 19, 1151-1164.
- WEILL-FASSINA, A. & FILLEUR C. (1989). Représentation et fonctionnement cognitif dans une recherche de panne d'un système d'allumage en mécanique-auto. *European Journal of Psychology of Education*, 4, 783-102.
- WEST, R., FRENCH, D., KEMP, R. & ELANDER, J. (1993). Direct observation of driving, self reports of driver behaviour, and accident involvement. *Ergonomics*, 36, 557-567.
- WIEDENBECK, S. & FIX, V. (1993). Characteristics of the mental representations of novice and expert programmers : an empirical study. *International Journal of Man-Machine Studies*, 793-812.
- WOGALTER, M. S. & LAUGHERY, K. R. (1996). Warning! Sign and label effectiveness. *Current Directions in Psychological Science*, 5, 33-37.
- WOODS, D. (1995). The alarm problem and directed attention in dynamic fault management. *Ergonomics*, 38, 2371-2393.
- XIANG, Z. & SRIHARI, S. N. (1986). A strategy for diagnosis based on empirical and model knowledge. In *Proceedings of the 6th International workshop on experts systems and their applications*. Avignon, France (pp. 835-848).
- YE, N. & SALVENDY, G. (1996). Expert-novice knowledge of computer programming at different levels of abstraction. *Ergonomics*, 39, 461-481.
- YOON, W. C. & HAMMER, J. M. (1988). Deep-reasoning fault diagnosis : an aid and a model. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 18, 659-676.

- ZAJCHOWSKI, R. & MARTIN, J. (1993). Differences in the problem-solving of stronger and weaker novices in physics : knowledge, strategies, or knowledge structure? *Journal of Research in Science Teaching*, 30, 459-470.
- ZAPF, D, MAIER, G. W., RAPPENBERGER, G. & IRMER, K. (1994). Error detection, tasks characteristics and some consequences for software design. *Applied Psychology : An International Review*, 43, 499-520.
- ZAPF, D. & REASON, J. (1994). Introduction : Human errors and error handling. *Applied Psychology : An International Review*, 43, 427-432.
- ZEITZ, C. M. & SPOEHR, K. T. (1989). Knowledge organization and the acquisition of procedural knowledge. *Applied Cognitive Psychology*, 3, 313-336.

6. TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Le modèle de Rasmussen (1986)	16
Figure 2 : Les composantes structurales principales de la machine faillible (Reason, 1990)	18
Figure 3 : Traitement concurrent par la base de connaissances et la mémoire de travail pendant la résolution de problème (Reason, 1990)	19
Figure 4 : Représentation des types de présentation utilisés par Zeitz et Spoehr (1989)	46
Figure 5 : Représentation graphique de la tâche de Hecht et Profitt (1995)	56
Figure 6 : Le réseau de Rouse (1978)	64
Figure 7 : Le réseau de Sanderson (1990) (adaptation).....	65
Figure 8 : Le réseau de Goldbeck et al. (1957).....	66
Figure 9 : Le réseau de Dale (1957)	66
Figure 10 : Succession des pas dans le chaînage avant	67
Figure 11 : Ordre de succession des pas dans le chaînage arrière.....	67
Figure 12 : Proposition de gestion des risques en anesthésie.	84
Figure 13 : Schéma d'implantation.....	106
Figure 14 : Schéma théorique	107
Figure 15 : Dispositif expérimental.....	107
Figure 16 : Détail de la panne.....	108
Figure 17 : Représentation graphique des résultats en valeurs brutes	112
Figure 18 : Représentation graphique des résultats en pourcentages.	113
Figure 19 : Proposition de fonctionnement du diagnostic expert (adapté de Rasmussen, 1986).....	115
Figure 20 : Représentation graphique des résultats significatifs en valeurs brutes	123
Figure 21 : Représentation graphique des résultats significatifs en pourcentages.	125
Figure 22 : Le dispositif expérimental.	133
Figure 23 : Représentation graphique des résultats significatifs en valeurs brutes.	139
Figure 24 : Représentation graphique des résultats significatifs en pourcentages.	139
Figure 25 : Le carton du compressiomètre.....	143
Figure 26 : Représentation graphique des résultats significatifs	149

Figure 27 : Proposition d'intégration du schéma dans les raccourcis du modèle Rasmussen.....	156
Figure 28 : Un Metro III	163
Figure 29 : Un Boeing 747	164
Figure 30 : Un Airbus A-320	166
Figure 31 : Un DC-9	168
Figure 32 : Un Boeing 737	173
Figure 33 : Un réacteur nucléaire (circuit primaire).	175
Figure 34 : Exemple d'arbre d'événement simplifié pour un accident de perte de réfrigérant dans une centrale nucléaire (Rasmussen, 1981)	184
Figure 35 : Exemple d'arbre d'erreur simplifié pour une panne électrique (Rasmussen, 1981)	185
Figure 36 : Exemple de réseau de Petri appliqué à l'accident d'avion de Kegworth (Johnson, 1997).....	186
Figure 37 : Principe d'occurrence d'un accident en aviation (adapté de Buffet, 1997)	190
Figure 38 : Présentation en polygones. Adapté de Greaney & McRae, 1996.....	192
Figure 39 : Schéma d'implantation en taille réelle	227
Figure 40 : Schéma théorique en taille réelle.....	228
Figure 41 : Grille de recueil de données en électronique	229
Figure 42 : Grille de recueil de données en mécanique	230
Tableau 1 : Table des moyennes	111
Tableau 2 : Table des moyennes des résultats significatifs.....	122
Tableau 3 : Table des moyennes des résultats significatifs.....	138
Tableau 4 : Table des moyennes des résultats significatifs.....	149
Tableau 5 : Exemple de tableau d'entités critiques appliqué à l'accident de Kegworth (Johnson, 1997).....	187
Tableau 6 : Exemple de FMECA (Failure Mode, Effets and Criticality Analysis) appliqué à l'accident d'avion de Kegworth (Johnson, 1997).	187

7. ANNEXES

7.1 SCHEMAS DU CIRCUIT ELECTRONIQUE

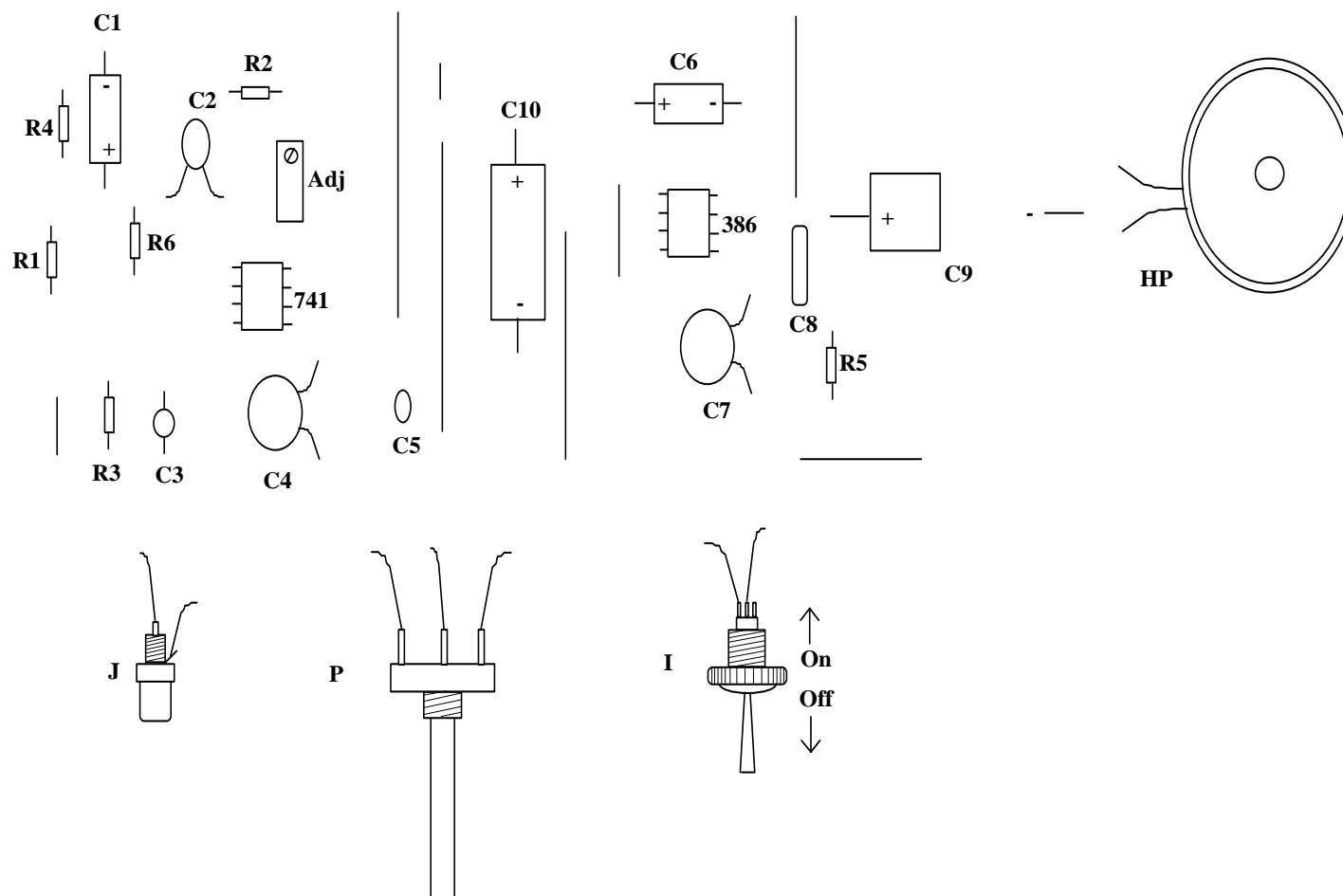


Figure 39 : Schéma d'implantation en taille réelle

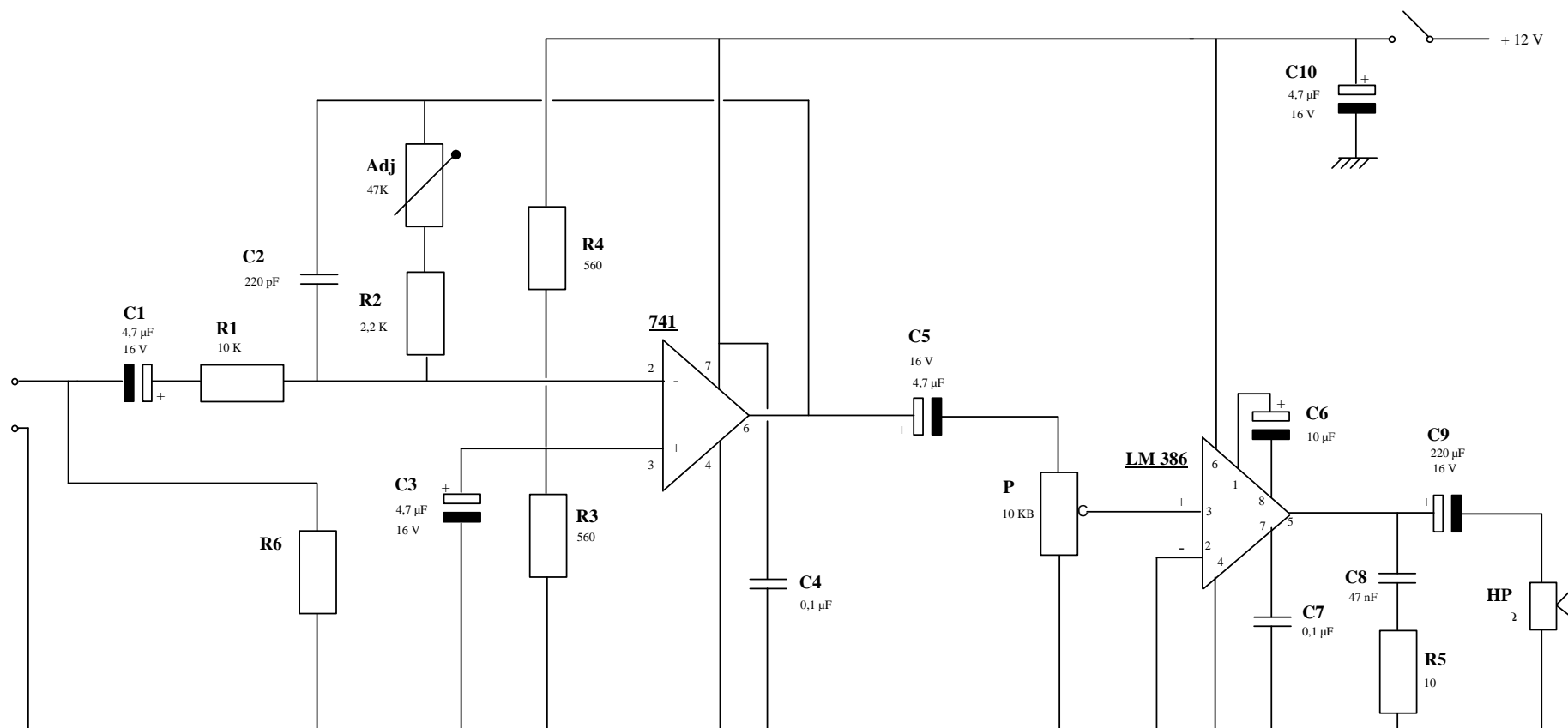


Figure 40 : Schéma théorique en taille réelle

7.2 GRILLES DE RECUEIL DE DONNEES

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
HP																				
I																				
P																				
J																				
Tsfo																				
Radio																				
Cordon																				
C1																				
C2																				
C3																				
C4																				
C5																				
C6																				
C7																				
C8																				
C9																				
C10																				
R1																				
R2																				
R3																				
R4																				
R5																				
R6																				
741																				
386																				
Adj																				

Figure 41 : Grille de recueil de données en électronique

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
démarrage																				
arrêt																				
test panne																				
vagabondage visuel																				
ALLUMAGE-																				
cosse1																				
cosse2																				
cosse3																				
cosse4																				
fil 1																				
fil 2																				
fil 3																				
fil 4																				
bougie 1																				
bougie 2																				
bougie 3																				
bougie 4																				
échange bougie																				
écartement bougie																				
tête delco-doigt																				
fil haute tension																				
bobine																				
ordre fils bougies																				
fils divers																				
MECANIQUE																				
démont. couv. culb.																				
remnt. couv. culb.																				
contrôle visuel Gal																				
contrôle visu cames																				
contrôle jeu culb																				
remont. couv. culb.																				
carton compressions																				
HYPOTHESES																				
cylindre manquant																				
soupape grillée																				
soupape bridée																				
piston																				
segments																				
mauvais carburant																				
trop de richesse																				
mauvaise combust°																				
ordre allumage																				
admission bouchée																				
prise d'air																				
DIVERS																				
filtre air																				
durites essence																				
filtre essence																				
arrivée essence																				
pompe essence																				
batterie																				
alternateur																				
doc																				

Figure 42 : Grille de recueil de données en mécanique

7.3 TABLES D'ANALYSE DE VARIANCE.

7.3.1 Expérience finale électronique

VD0

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,365497076	1	0,365497076	1,53208	0,23262328
A l'intérieur des groupes	4,055555556	17	0,238562092		
Total	4,421052632	18			

VD1

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	1333,391813	1	1333,391813	4,12923	0,05807794
A l'intérieur des groupes	5489,555556	17	322,9150327		
Total	6822,947368	18			

VD2

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	3989,791813	1	3989,791813	1,99202	0,17617052
A l'intérieur des groupes	34049,15556	17	2002,891503		
Total	38038,94737	18			

VD3

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	40,14269006	1	40,14269006	1,16358	0,29579284
A l'intérieur des groupes	586,4888889	17	34,49934641		
Total	626,6315789	18			

VD4

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,053659205	1	0,053659205	1,07173	0,31505882
A l'intérieur des groupes	0,8511569	17	0,050068053		
Total	0,904816105	18			

VD5

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,000736189	1	0,000736189	0,02551	0,87498705
A l'intérieur des groupes	0,4906156	17	0,028859741		
Total	0,491351789	18			

VD6

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,053760084	1	0,053760084	0,12994	0,72292971
A l'intérieur des groupes	7,0331736	17	0,413716094		
Total	7,086933684	18			

VD7

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	871,8368421	1	871,8368421	11,8485	0,0031105
A l'intérieur des groupes	1250,9	17	73,58235294		
Total	2122,736842	18			

VD8

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,235863678	1	0,235863678	10,8883	0,00423246
A l'intérieur des groupes	0,368256322	17	0,021662137		
Total	0,60412	18			

VD9

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	396,0988304	1	396,0988304	10,4833	0,0048374
A l'intérieur des groupes	642,3222222	17	37,78366013		
Total	1038,421053	18			

VD10

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,058234176	1	0,058234176	13,0956	0,00212065
A l'intérieur des groupes	0,075596456	17	0,00444685		
Total	0,133830632	18			

VD11

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	2467,202339	1	2467,202339	17,1337	0,00068592
A l'intérieur des groupes	2447,955556	17	143,9973856		
Total	4915,157895	18			

VD12

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,537639205	1	0,537639205	30,5995	3,6602E-05
A l'intérieur des groupes	0,2986929	17	0,017570171		
Total	0,836332105	18			

VD13

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	238,0374269	1	238,0374269	2,03503	0,17181874
A l'intérieur des groupes	1988,488889	17	116,9699346		
Total	2226,526316	18			

VD14

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,497698204	1	0,497698204	14,5607	0,00138246
A l'intérieur des groupes	0,581076322	17	0,03418096		
Total	1,078774526	18			

VD15

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	322,8356725	1	322,8356725	0,48541	0,49539915
A l'intérieur des groupes	11306,32222	17	665,0777778		
Total	11629,15789	18			

VD16

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	7,975459371	1	7,975459371	1,2544	0,27828751
A l'intérieur des groupes	108,0854292	17	6,357966421		
Total	116,0608885	18			

VD17

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	6,447368421	1	6,447368421	0,00698	0,9343883
A l'intérieur des groupes	15700,5	17	923,5588235		
Total	15706,94737	18			

VD18

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	1302,376463	1	1302,376463	9,9602	0,00576845
A l'intérieur des groupes	2222,888053	17	130,7581207		
Total	3525,264516	18			

VD19

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,539236232	1	0,539236232	11,3406	0,00365538
A l'intérieur des groupes	0,8083364	17	0,0475492		
Total	1,347572632	18			

VD20

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	13,68947368	1	13,68947368	2,47312	0,13423283
A l'intérieur des groupes	94,1	17	5,535294118		
Total	107,7894737	18			

VD21

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,025682532	1	0,025682532	2,25109	0,15186402
A l'intérieur des groupes	0,1939521	17	0,011408947		
Total	0,219634632	18			

VD22

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	2129,801681	1	2129,801681	7,82774	0,01351932
A l'intérieur des groupes	4081,257143	15	272,0838095		
Total	6211,058824	16			

VD23

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	1220,839683	1	1220,839683	4,18324	0,06339575
A l'intérieur des groupes	3502,088889	12	291,8407407		
Total	4722,928571	13			

VD24

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	2282,272269	1	2282,272269	7,95169	0,0129304
A l'intérieur des groupes	4305,257143	15	287,0171429		
Total	6587,529412	16			

VD25

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	6336,983435	1	6336,983435	11,8812	0,0035946
A l'intérieur des groupes	8000,459553	15	533,3639702		
Total	14337,44299	16			

VD26

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	1366,163417	1	1366,163417	6,414	0,0262
A l'intérieur des groupes	2555,652676	12	212,9710563		
Total	3921,816093	13			

VD27

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	7814,945965	1	7814,945965	16,0354	0,00114894
A l'intérieur des groupes	7310,351888	15	487,3567925		
Total	15125,29785	16			

VD28

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	1105,5625	1	1105,5625	1,88149	0,19174787
A l'intérieur des groupes	8226,375	14	587,5982143		
Total	9331,9375	15			

VD29

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,02030625	1	0,02030625	0,654	0,43221349
A l'intérieur des groupes	0,4346875	14	0,031049107		
Total	0,45499375	15			

VD30

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	689,0625	1	689,0625	1,77011	0,20463461
A l'intérieur des groupes	5449,875	14	389,2767857		
Total	6138,9375	15			

VD31

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	8426,785714	1	8426,785714	8,43966	0,01431368
A l'intérieur des groupes	10983,21429	11	998,474026		
Total	19410	12			

VD32

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,569075238	1	0,569075238	4,08615	0,07081175
A l'intérieur des groupes	1,392691429	10	0,139269143		
Total	1,961766667	11			

VD33

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	3569,260073	1	3569,260073	6,67373	0,0254377
A l'intérieur des groupes	5883,047619	11	534,8225108		
Total	9452,307692	12			

7.3.2 Pré-expérience mécanique

VD1

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	175,5625	1	175,5625	7,50783	0,01595383
A l'intérieur des groupes	327,375	14	23,38392857		
Total	502,9375	15			

VD2

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	1	1	1	0,875	0,36543034
A l'intérieur des groupes	16	14	1,142857143		
Total	17	15			

VD3

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,035438062	1	0,035438062	10,3531	0,00619947
A l'intérieur des groupes	0,047921375	14	0,003422955		
Total	0,083359438	15			

VD4

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,25	1	0,25	2,33333	0,14890387
A l'intérieur des groupes	1,5	14	0,107142857		
Total	1,75	15			

VD5

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	46,0952381	1	46,0952381	5,05923	0,0440548
A l'intérieur des groupes	109,3333333	12	9,111111111		
Total	155,4285714	13			

VD6

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,197485714	1	0,197485714	5,65397	0,03490182
A l'intérieur des groupes	0,419144	12	0,034928667		
Total	0,616629714	13			

VD7

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	1	1	1	0,4	0,53728237
A l'intérieur des groupes	35	14	2,5		
Total	36	15			

VD8

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,111138891	1	0,111138891	14,6651	0,00184047
A l'intérieur des groupes	0,106098719	14	0,00757848		
Total	0,217237609	15			

VD9

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	52,5625	1	52,5625	3,81529	0,07106989
A l'intérieur des groupes	192,875	14	13,77678571		
Total	245,4375	15			

VD10

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,016384	1	0,016384	0,28213	0,60363366
A l'intérieur des groupes	0,81301375	14	0,058072411		
Total	0,82939775	15			

VD11

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	5,0625	1	5,0625	1,25721	0,28104531
A l'intérieur des groupes	56,375	14	4,026785714		
Total	61,4375	15			

VD12

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,007569	1	0,007569	0,28705	0,600524
A l'intérieur des groupes	0,369151	14	0,026367929		
Total	0,37672	15			

VD13

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,5625	1	0,5625	1,61538	0,22444948
A l'intérieur des groupes	4,875	14	0,348214286		
Total	5,4375	15			

VD14

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,00172225	1	0,00172225	1,95286	0,18403238
A l'intérieur des groupes	0,01234675	14	0,000881911		
Total	0,014069	15			

7.3.3 Expérience finale mécanique

VD1

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	47,83391813	1	47,83391813	0,21872	0,64595918
A l'intérieur des groupes	3717,955556	17	218,703268		
Total	3765,789474	18			

VD2

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	105,1321637	1	105,1321637	0,51398	0,48315679
A l'intérieur des groupes	3477,288889	17	204,5464052		
Total	3582,421053	18			

VD3

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,112014971	1	0,112014971	0,95458	0,34225539
A l'intérieur des groupes	1,994857556	17	0,117344562		
Total	2,106872526	18			

VD4

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	103,1578947	1	103,1578947	3,46578	0,08003173
A l'intérieur des groupes	506	17	29,76470588		
Total	609,1578947	18			

VD5

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,026581616	1	0,026581616	0,86248	0,36604658
A l'intérieur des groupes	0,523942489	17	0,030820146		
Total	0,550524105	18			

VD6

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,005263158	1	0,005263158	0,00343	0,95399322
A l'intérieur des groupes	26,1	17	1,535294118		
Total	26,10526316	18			

VD7

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,004075789	1	0,004075789	1,19134	0,29028752
A l'intérieur des groupes	0,05816	17	0,003421176		
Total	0,062235789	18			

VD8

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,598830409	1	0,598830409	0,18914	0,66910115
A l'intérieur des groupes	53,82222222	17	3,166013072		
Total	54,42105263	18			

VD9

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	223,9042765	1	223,9042765	0,8986	0,356439
A l'intérieur des groupes	4235,895366	17	249,1703156		
Total	4459,799642	18			

VD10

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,002339181	1	0,002339181	0,00208	0,96419
A l'intérieur des groupes	19,15555556	17	1,126797386		
Total	19,15789474	18			

VD11

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,003257076	1	0,003257076	0,71914	0,408209
A l'intérieur des groupes	0,076995556	17	0,00452915		
Total	0,080252632	18			

VD12

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	27	1	27	0,35126	0,566562
A l'intérieur des groupes	768,6666667	10	76,86666667		
Total	795,6666667	11			

VD13

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	15,41333333	1	15,41333333	0,01372	0,909076
A l'intérieur des groupes	11234,66667	10	1123,466667		
Total	11250,08	11			

VD14

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,014619883	1	0,014619883	0,05263	0,821283
A l'intérieur des groupes	4,722222222	17	0,277777778		
Total	4,736842105	18			

VD15

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	5,731578947	1	5,731578947	0,37928	0,546147
A l'intérieur des groupes	256,9	17	15,11176471		
Total	262,6315789	18			

VD16

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,157459229	1	0,157459229	5,91792	0,026324
A l'intérieur des groupes	0,452322456	17	0,026607203		
Total	0,609781684	18			

VD17

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	15,15847953	1	15,15847953	0,41578	0,527658
A l'intérieur des groupes	619,7888889	17	36,45816993		
Total	634,9473684	18			

VD18

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	193,670895	1	193,670895	0,30415	0,588469
A l'intérieur des groupes	10824,95992	17	636,762348		
Total	11018,63081	18			

VD19

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	2,176023392	1	2,176023392	0,12478	0,72824691
A l'intérieur des groupes	296,4555556	17	17,43856209		
Total	298,6315789	18			

VD20

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,003760992	1	0,003760992	0,34624	0,5639834
A l'intérieur des groupes	0,184657956	17	0,010862233		
Total	0,188418947	18			

VD21

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	20,4497076	1	20,4497076	0,32022	0,57887111
A l'intérieur des groupes	1085,655556	17	63,8620915		
Total	1106,105263	18			

VD22

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,002290316	1	0,002290316	0,06786	0,79761131
A l'intérieur des groupes	0,573781789	17	0,03375187		
Total	0,576072105	18			

VD23

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,716374269	1	0,716374269	0,07024	0,79417835
A l'intérieur des groupes	173,3888889	17	10,19934641		
Total	174,1052632	18			

VD24

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,137199116	1	0,137199116	1,61436	0,22099344
A l'intérieur des groupes	1,444772989	17	0,084986646		
Total	1,581972105	18			

VD25

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,257894737	1	0,257894737	0,03068	0,8630249
A l'intérieur des groupes	142,9	17	8,405882353		
Total	143,1578947	18			

VSD26

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	3,56778E-05	1	3,56778E-05	0,00694	0,93458274
A l'intérieur des groupes	0,087400322	17	0,005141195		
Total	0,087436	18			

VD27

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,002623347	1	0,002623347	0,01313	0,91012609
A l'intérieur des groupes	3,3973616	17	0,1998448		
Total	3,399984947	18			

VD28

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	1,08128655	1	1,08128655	5,02848	0,03855719
A l'intérieur des groupes	3,655555556	17	0,21503268		
Total	4,736842105	18			

VD29

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	1,291812865	1	1,291812865	0,46082	0,50637651
A l'intérieur des groupes	47,65555556	17	2,803267974		
Total	48,94736842	18			

VD30

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,001446976	1	0,001446976	0,35336	0,56004681
A l'intérieur des groupes	0,069613656	17	0,004094921		
Total	0,071060632	18			

VD31

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,253687476	1	0,253687476	2,15717	0,16016703
A l'intérieur des groupes	1,999233156	17	0,11760195		
Total	2,252920632	18			

VD32

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,716374269	1	0,716374269	0,38798	0,54162795
A l'intérieur des groupes	31,38888889	17	1,846405229		
Total	32,10526316	18			

VD33

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,001160983	1	0,001160983	0,60678	0,4467123
A l'intérieur des groupes	0,032527122	17	0,00191336		
Total	0,033688105	18			

VD34

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>dl</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>
Entre Groupes	0,113753689	1	0,113753689	0,44239	0,51489616
A l'intérieur des groupes	4,3713281	17	0,257136947		
Total	4,485081789	18			

7.4 TABLES DE DONNEES

7.4.1 Pré-expérience en électronique

	Novice			Expert		
Sujets	S1	S2	S3	S4	S5	S6
HP	1	1	1	1		2
I	1			4		
P				5	1	1
J				1		2
Tsfo	2		2		1	
Radio					1	
Cordon			1			
C1			2	2		
C2				1		
C3						
C4						
C5			1	1		
C6		1		1	5	
C7		1	1	1	1	2
C8	1		1	3		
C9	1	1	1	2	1	3
C10	1			3		1
R1			1	2		
R2				1		
R3						
R4						
R5	1				1	
R6						1
CI 741	3	2	4	6	2	3
CI 386	3	1	2	27	20	9
Adj			1			
Total	14	7	18	61	33	24
Identif. panne ?	non	oui	oui	oui	oui	oui

7.4.2 Expérience finale en électronique

<i>n°</i>	<i>VD</i>	<i>VT</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>moy.</i>	<i>s</i>
0	panne trouvée	E	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0,5	0,527
		N	1	0	0	0	0	0	0	0	1		0,22	0,44
1	temps (mn)	E	40	39	73	39	55	79	45	13	21	66	47	21,44
		N	18	17	42	40	27	40	48	29	11		30,22	12,99
2	nb op° total	E	58	66	95	70	39	156	55	16	38	195	78,8	55,93
		N	55	31	32	47	41	55	111	61	15		49,78	2713
3	nb d'éléments	E	14	19	19	15	26	21	23	12	9	20	17,8	5,22
	couverts	N	16	12	11	23	10	16	25	17	4		14,89	6,52
4	ratio nb élém. couv.	E	0,538	0,73	0,73	0,576	1	0,807	0,884	0,461	0,346	0,769	0,684	0,2
	/nb cposants	N	0,615	0,461	0,423	0,884	0,434	0,615	0,961	0,653	0,153		0,577	0,24
5	ratio nb élém couv.	E	0,241	0,287	0,2	0,214	0,666	0,134	0,418	0,75	0,236	0,102	0,324	0,22
	/nb total T	N	0,29	0,387	0,343	0,489	0,243	0,29	0,225	0,278	0,266		0,312	0,08
6	nb T/mn	E	1,45	1,692	1,3	1,794	0,709	1,974	1,22	1,23	1,809	2,95	1,612	0,59
		N	3,055	1,823	0,761	1,175	1,51	1,375	2,312	2,1	1,363		1,719	0,68
7	nb d'op° sur CI386	E	12	21	35	1	5	30	11	7	26	11	15,9	11,42
		N	6	1	1	2	0	1	9	1	0		2,333	3,08
8	ratio op° CI386	E	0,2	0,318	0,368	0,014	0,128	0,192	0,2	0,437	0,684	0,056	0,259	0,19
	/nb op° total	N	0,109	0,032	0,031	0,042	0	0,018	0,081	0,016	0		0,036	0,03
9	nb op° CI741	E	5	16	13	18	3	25	13	1	0	13	10,7	8,17
		N	2	0	0	2	0	1	7	2	0		1,555	2,24
10	ratio op° CI741	E	0,086	0,242	0,136	0,257	0,076	0,16	0,236	0,062	0	0,066	0,132	0,08
	/nb op° total	N	0,036	0	0	0,042	0	0,018	0,063	0,032	0		0,021	0,02
11	nb op° CI	E	17	37	48	19	8	55	24	8	26	24	26,6	15,73
	(386 + 741)	N	8	1	1	4	0	1	16	3	0		3,777	5,23
12	ratio op° CI	E	0,293	0,56	0,505	0,271	0,205	0,352	0,436	0,5	0,684	0,123	0,392	0,17
	/nb op° total	N	0,145	0,032	0,031	0,085	0	0,018	0,144	0,049	0		0,056	0,05
13	Nb op° sur	E	18	5	11	18	22	42	14	4	7	27	16,8	11,59
	condensateurs	N	21	20	22	20	12	27	44	34	15		23,89	9,86
14	ratio op° cond.	E	0,31	0,075	0,115	0,014	0,564	0,269	0,254	0,25	0,184	0,138	0,217	0,15
	/nb op° total	N	0,381	0,645	0,687	0,425	0,292	0,49	0,396	0,557	1		0,541	0,21
15	Nb op° sur	E	14	9	16	8	13	7	5	0	0	115	18,7	34,26
	résistances	N	8	4	1	8	29	18	7	19	0		10,44	9,6
16	ratio op° résist	E	0,017	0,136	0,168	0,114	3	0,044	11	0	0	0,589	1,506	3,45
	/nb op° total	N	0,145	0,129	0,031	0,17	0,707	0,327	0,063	0,311	0		0,209	0,21
17	nb op° condo	E	32	14	27	26	35	49	19	4	7	142	35,5	39,77
	+ resist	N	29	24	23	28	41	45	51	53	15		34,33	13,51
18	ratio op° condo +	E	1,882	0,378	0,562	1,368	4,375	0,89	0,791	0,5	0,269	5,91	1,692	1,91
	resist /nb op° sur CI	N	3,62	24	23	7	41	45	3,18	17,67	0		18,27	16,54
19	ratio condo + résist	E	0,551	0,212	0,284	0,371	0,897	0,314	0,345	0,25	0,184	0,728	0,413	0,23
	/nb op° total	N	0,527	0,774	0,718	0,595	1	0,818	0,459	0,868	1		0,751	0,19
20	Nb op° C7	E	1	2	3	1	1	3	0	2	0	0	1,3	0,45
		N	9	4	0	2	0	0	2	3	7		3	0,18
21	ratio nb op° C7	E	0,017	0,03	0,01	0,014	0,025	0,006	0	0,125	0	0	0,022	0,03
	/ nb T total	N	0,163	0,129	0	0,042	0	0	0,018	0,049	0,466		0,096	0,15

22	nb op° avant 1 ^{ère}	E	8	1	6	0	1	1	1	2	2	2	2,4	2,54
	op° sur CI	N	6	30	9	5 *		43	74	9 *			25,14	25,89
23	nb op° avant 1 ^{ère}	E	8	4	6	0	1	2	1	3 *		3	3,111	2,57
	op° CI741	N	5 *	*		8 *		13	75	9 *			22	29,76
24	nb op° avant 1 ^{ère}	E	16	1	17	1	2	1	2	2	2	2	4,6	6,29
	op° CI 386	N	6	30	9	5 *		41	77	29 *			28,14	25,65
25	% op av 1 ^{er} T CI	E	13,7	1,51	6,31	0	2,56	0,06	1,81	12,5	5,26	1,02	4,473	4,994
		N	10,9	96,7	28,1	10,63 *		78,18	66,66	14,75 *			43,7	36
26	% op av 1 ^{er} T 741	E	13,7	6,06	6,31	0	2,56	1,28	1,81	18,75 *		1,53	5,778	6,414
		N	9,09 *	*		17,02 *		23,6	67,56	14,7 *			26,39	23,59
27	% op av 1 ^{er} T 386	E	27,5	1,51	1,05	1,42	5,12	0,06	3,63	0,125	5,2	1,02	4,664	8,244
		N	10,9	96,7	28,1	10,6 *		74,5	69,3	47,5 *			48,23	33,41
28	nb op° avant 1 ^{ère}	E	38 *		13	35	6	37	34	5 *		110	34,75	33,51
	op° C5	N	21	8	9	18	30	22	21	16 *			18,13	7,19
29	ratio nb op° av. 1 ^{ère}	E	0,655 *		0,406	0,5	0,153	0,237	0,618	0,312 *		0,564	0,43	0,018
	op° C5 /nb op° tot.	N	0,381	0,258	0,281	0,382	0,731	0,4	0,189	0,262 *			0,36	0,16
30	nb op° amont C5 ap.	E	0 *		22	25	23	32	7	0 *		79	23,5	25,45
	1 ^{ère} op° C5	N	0	0	4	20	10	0	30	19 *			10,38	11,43
31	Nb op° avant 1 ^{ère}	E	58	64	64	48	33	149 *		15 *	*		61,57	42,5
	op° C7	N	14	17 *		7 *	*		10	13	2		10,5	5,39
32	ratio nb op° av. 1 ^{ère}	E	1	0,969	0,01	0,014	0,846	0,955 *		0,93 *	*		0,674	0,45
	op° C7 /nb op° total	N	0,254	0,548 *		0,148 *	*		0,09		0,133		0,234	0,18
33	nb op° non C7 ap.	E	0	0	0	23	7	1 *		0 *	*		4,428	8,58
	1 ^{ère} op° C7	N	30	11 *		38 *	*		98	43	6		37,67	32,98

Les ratios de cette table ont été multipliés par 100 pour obtenir des pourcentages.

7.4.3 Pré-expérience en mécanique

<i>n°</i>	<i>VD</i>	<i>VI</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>moy</i>	<i>s</i>
1	nb d'opérations total	E	10	7	16	9	21	5	9	9	10,75	5,203
		N	15	26	16	17	21	11	17	16	17,375	4,438
2	total tirer fil4	E	2	1	2	2	4	1	2	2	2	0,926
		N	3	0	2	3	0	1	2	1	1,5	1,195
3	ratio tirer fil4	E	0,2	0,142	0,125	0,222	0,19	0,2	0,222	0,222	0,1904	0,037
	/nb d'op° total	N	0,2	0	0,125	0,176	0	0,09	0,117	0,062	0,0963	0,074
4	tirer fils	E	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
		N	1	0	1	1	0	1	1	1	0,75	0,463
5	nb op° av. tirer un fil	E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		N	1		0	0		3	6	12	3,6667	4,676
6	ratio nb op° av. tirer fil	E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	/nb d'op° total	N	0,066		0	0		0,272	0,352	0,75	0,24	0,29
7	toutes op° sur cyl4	E	4	3	5	3	7	1	4	3	3,75	1,753
		N	5	1	3	4	5	2	3	3	3,25	1,389
8	ratio toutes op° cyl4	E	0,4	0,428	0,313	0,333	0,333	0,2	0,444	0,333	0,3479	0,078
	/nb d'op° total	N	0,333	0,038	0,062	0,235	0,238	0,181	0,176	0,187	0,1813	0,096
9	op° électriques	E	6	5	12	9	15	5	9	7	8,5	3,546
		N	14	15	13	10	17	5	9	14	12,125	3,871
10	ratio op° élec	E	0,6	0,714	0,75	1	0,714	1	1	0,777	0,8194	0,158
	/nb d'op° total	N	1,4	0,576	0,812	0,588	0,809	0,454	0,529	0,875	0,7554	0,302
11	op° mécaniques	E	5	1	1	1	1	0	0	0	1,125	1,642
		N	0	0	3	1	0	4	6	4	2,25	2,315
12	ratio op° méca	E	0,5	0,142	0,062	0,111	0,047	0	0	0	0,1078	0,167
	/nb d'op° total	N	0	0	0,187	0,058	0	0,363	0,352	0,25	0,1513	0,157

Les ratios de cette table ont été multipliés par 100 pour obtenir des pourcentages.

7.4.4 Expérience finale en mécanique

<i>n°</i>	<i>VD</i>	<i>VI</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>moy</i>	<i>s</i>
1	temps (mn)	E	48	31	23	13	8	28	24	22	44	55	29,6	15,167
		N	12	36	40	59	27	27	20	47	27		32,778	14,351
2	nb d'opérations total	E	27	10	19	4	6	27	25	14	40	42	21,4	13,235
		N	14	63	18	37	20	27	20	19	17		26,111	15,415
3	nb op°/mn	E	0,562	0,322	0,826	0,307	0,75	0,964	1,041	0,636	0,909	0,763	0,708	0,2521
		N	1,16	1,75	0,45	0,627	0,74	1	1	0,4	0,629		0,8618	0,4218
4	nb éléments couverts	E	10	5	7	3	4	11	12	13	17	18	10	5,2281
		N	8	25	10	22	13	13	10	17	14		14,667	5,7009
5	ratio nb élém couverts	E	0,37	0,5	0,368	0,75	0,666	0,407	0,48	0,928	0,425	0,428	0,5322	0,1877
	/nb total op°	N	0,571	0,396	0,555	0,594	0,65	0,481	0,5	0,894	0,823		0,6071	0,1608
6	doc	E	1	1	2	1	0	1	1	1	1	4	1,3	1,0593
		N	0	3	1	4	2	0	0	1	1		1,3333	1,4142
7	ratio doc	E	0,037	0,1	0,105	0,25	0	0,037	0,04	0,071	0,025	0,095	0,076	0,0705
	/nb op° total	N	0	0,047	0,055	0,108	0,1	0	0	0,052	0,058		0,0467	0,0409
8	total tirer fil 4	E	5	0	4	0	2	4	1	0	2	0	1,8	1,9322
		N	2	3	0	0	4	3	1	0	0		1,4444	1,5899
9	% tirer fil4	E	18,51	0	21,05	0	66,66	14,81	4	0	5	0	13,003	20,545
		N	14,28	4,76	0	0	20	11,11	5	0	0		6,1278	7,3914
10	répét tirer fil 4	E	2	1	2	0	0	2	0	0	1	0	0,8	0,9189
		N	0	2	0	0	3	2	0	0	0		0,7778	1,2019
11	ratio répét fil 4	E	0,07	0,1	0,05	0	0	0,07	0	0	0,25	0	0,054	0,0786
	/nb op° total	N	0	0,03	0	0	0,15	0,07	0	0	0		0,0278	0,0517
12	nb op avant 1 ^{er} tirer	E	0 *		0 *		0	8	6 *		24 *		6,3333	9,331
	un fil	N	0	0	0 *		20	0	0 *	*			3,3333	8,165
13	% op av 1 ^{er} tirer un fil	E	0 *		0 *		0	29,6	24 *		60 *		18,933	24,089
		N	0	0	0 *		100	0	0 *	*			16,667	40,825
14	tirer fils	E	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0,5	0,527
		N	1	1	0	0	1	1	1	0	0		0,5556	0,527
15	toutes op° sur cyl. 4	E	11	4	11	2	5	12	6	5	10	5	7,1	3,5418
		N	3	13	5	7	5	13	2	3	3		6	4,2426
16	ratio nb op° cyl. 4	E	0,407	0,4	0,578	0,5	0,83	0,444	0,24	0,333	0,25	0,119	0,4101	0,1997
	/nb op° total	N	0,214	0,206	0,277	0,189	0,25	0,481	0,1	0,157	0,176		0,2278	0,1079
17	nb op avant 1 ^{ere} op	E	0	9	2	1	0	11	3	5	3	25	5,9	7,6514
	cyl4	N	4	0	3	5	4	0	3	7	11		4,1111	3,4075
18	% op av 1 ^{ere} op cyl4	E	0	90	10,5	25	0	40,7	12	35,7	7,5	59,52	28,092	29,093
		N	28,57	0	16,66	13,51	20	0	15	36,84	64,7		21,698	20,023
19	nb op° sous-opti	E	3	0	0	0	0	1	7	1	5	14	3,1	4,5326
		N	0	9	1	11	2	4	3	2	2		3,7778	3,7342
20	ratio nb op° sous-opti	E	0,11	0	0	0	0	0,037	0,28	0,071	0,125	0,333	0,0956	0,1211
	/nb op° total	N	0	0,142	0,055	0,297	0,1	0,148	0,15	0,105	0,117		0,1238	0,0811
21	op° électriques	E	15	5	16	2	4	20	14	11	26	14	12,7	7,4692
		N	12	35	10	15	16	13	18	9	5		14,778	8,5408

22	ratio op° elec	E	0,555	0,5	0,842	0,5	0,666	0,74	0,56	0,785	0,65	0,333	0,6131	0,1536
	/nb op° total	N	0,857	0,555	0,555	0,405	0,8	0,481	0,9	0,473	0,294		0,5911	0,2125
23	op° mécaniques	E	9	5	5	5	4	3	0	4	6	4	4,5	2,273
		N	0	7	6	11	0	8	0	6	6		4,8889	3,9826
24	ratio op° meca	E	0,333	0,5	0,263	1,25	0,666	0,111	0	0,285	0,15	0,095	0,3653	0,3692
	/nb op° total	N	0	0,111	0,333	0,297	0	0,4	0	0,3	0,315		0,1951	0,1651
25	op° carburation	E	2	0	0	0	0	1	1	0	5	10	1,9	3,2472
		N	0	7	0	2	0	4	0	2	0		1,6667	2,4495
26	ratio op° carbu	E	0,074	0	0	0	0	0	0	0	0,125	0,238	0,0437	0,0807
	/nb op° total	N	0	0,111	0	0,054	0	0,148	0	0,105	0		0,0464	0,06
27	ratio op° carbu	E	0,666	0	0	0	0	1	0,142	0	1	0,714	0,3522	0,4388
	/nb op° sous-opti	N	0	0,777	0	0,181	0	1	0	1	0		0,3287	0,4561
28	carton compressions	E	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0,7	0,483
		N	0	0	1	0	0	1	0	0	0		0,2222	0,441
29	nb op° sur HT	E	0	0	0	0	0	0	6	0	0	1	0,7	1,8886
		N	0	2	1	4	2	0	2	0	0		1,2222	1,3944
30	ratio op° sur HT	E	0	0	0	0	0	0	0,24	0	0	0,023	0,0263	0,0754
	/nb op° total	N	0	0,031	0,055	0,108	0,1	0	0,1	0	0		0,0438	0,048
31	ratio op° HT	E	0	0	0	0	0	0	0,857	0	0	0,071	0,0928	0,2694
	/nb op° sous-opti	N	0	0,222	1	0,363	1	0	0,333	0	0		0,3242	0,4102
32	nb op° sur distribut°	E	1	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0,5	0,9718
		N	0	0	0	5	0	0	1	0	2		0,8889	1,6915
33	ratio op° sur distribut°	E	0,037	0	0	0	0	0	0	0,071	0	0,071	0,0179	0,0303
	/nb op° total	N	0	0	0	0,135	0	0	0,05	0	0,117		0,0336	0,0551
34	ratio op° sur distribut°	E	0,333	0	0	0	0	0	0	1	0	0,214	0,1547	0,3193
	/nb d'op° sous-opti	N	0	0	0	0,454	0	0	0,333	0	2		0,3097	0,6571

Les ratios de cette table ont été multipliés par 100 pour obtenir des pourcentages.